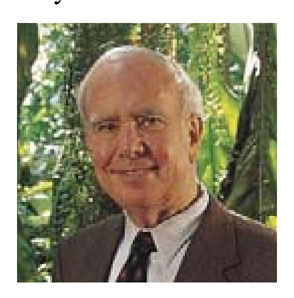
PLANETAS DE TRAYECTORIA INESTABLE • MATEMATICAS SOCIALES • EMIGRACION MEXICANA EN EE.UU.





Noviembre de 1999 Número 278

SECCIONES

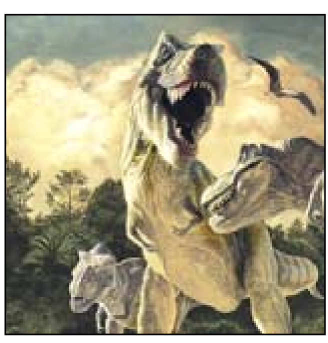






Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Pintado por Sano Kazuhiko

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4	Jana Brenning; Don Dixon (*recuadro*)
5	Don Dixon
6-7	Don Dixon; Laurie Grace (*gráfica*)
8-9	Laurie Grace (*gráfica*); Don Dixon
10	Don Dixon
14-17	Alexander and Turner Studio
18-19	Alexander and Turner Studio (*arriba*); V. Dietz, Balchrist Hospital, Zurich (*abajo*, *izquierda*); Christian Broesamle, Univ. de Zurich (*abajo*, *derecha*)
20	Heidi Noland
21	Bill Hickey, *Allsport* (*arriba*) David Drapkin. *NFL Photos* (*abajo*)
22-23	Alfred T. Kamajian; fuente: Neurocontrol Corporation
27	Slim Films; Corbis/Bettmann (*fotografía*)
28	Randy Montoya
29	Laurie Grace
30	Jared Schneidman Design
52-53	Sano Kazuhiko
54-55	Louis Psihoyos *Matrix* (*izquierda*); Gregory M. Erickson (*inserto*) Patricia C. Wynne (*dibujos*)
56	Gregory M. Erickson (*arriba*); Karen Chin (*abajo*)
57	François Gohier (*fotografía*); Sarah Donelson (*gráfica*)
60	François Gohier
61	Cortesía de William L. Abler
62-68	Carlos G. Vélez Ibáñez
70	Karen Sherlock
71	Theodore C. Levin
72	Patricia C. Wynne (*arriba, izquierda*); Lisa Burnett (*derecha*); Bryan Christie (*abajo*)
73	Bryan Christie, fuente: David Berners
75	Laurie Grace, fuente: Michael E. Edgerton (*gráfica*); Michael E. Edgerton (*abajo*)
76	Lisa Burnett, fuente: Theodore C. Levin (*arriba*); Bryan Christie, fuente: Michael E. Edgerton (*abajo*)
77	Theodore C. Levin
78	Lauros-Giraudon
79	Collection Viollet
80	Roger-Viollet
81	Eric Lessing
82	Colección particular, pintado por F. J. Navez (*arriba*); Pour la Science (*abajo*)
84	Daniels & Daniels
85	Laurie Grace
86-87	Bryan Christie
88	Dusan Petricic
96	George Retseck

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mónica Murphy: *Migración planetaria*; Cristóbal Pera: *Reparación de la médula espinal*; José Joaquín Moratalla García: *Así vivía* Tyrannosaurus rex y *Dientes de tiranosaurio*; Andrés Levin-Richter: *Los cantores diafónicos de Tuva*; Luis Bou: *El nacimiento de las matemáticas sociales* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

Ciencia y sociedad:

Pere Molera: *Fullerenos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors;* Graham P. Collins; Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.150 pta.	20.700 pta.
	67,01 euro	124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

LOS SOVIÉTICOS ENTRAN EN LA CARRERA DE ARMAMENTOS. «A las once de la mañana del 23 de septiembre, el presidente Truman anunció el fin del monopolio norteamericano sobre la bomba atómica. Su comunicado acerca de que la URSS había producido una explosión atómica se basaba en una cuidadosa evaluación, efectuada por científicos, de ciertos datos no especificados. Según el comentario oficial de la URSS radiado dos días después por Tass, la agencia de noticias soviética: 'En lo que respecta a la alarma que con este motivo están difundiendo ciertos círculos extranjeros, no existe la menor base para tal alarma. Debe señalarse que el gobierno soviético, pese a la existencia en su país de un arma atómica, adopta y se propone adoptar en el futuro su postura ya mantenida a favor de la prohibición absoluta del uso del arma atómica.'»

...cien años

EL ELECTRÓN. «En la reciente reunión de la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia, el profesor J. J. Thomson ofreció un interesante informe acerca de las últimas investigaciones sobre la existencia de masas menores que los átomos. Sus estudios desembocaron en la determinación del cociente entre la masa de un átomo y la carga eléctrica que transporta. Sus experimentos mostraron que la carga transportada por un átomo en las descargas catódicas es evidentemente 1000 veces mayor que en la electrólisis ordinaria. Parece que la electrificación estriba en la pérdida, por el átomo, de un pequeño corpúsculo, consistente éste en una muy pequeña parte de la masa del átomo y dotado de una carga negativa, mientras que el resto del átomo posee una carga positiva.»

EL PULGÓN DEL GUISANTE. «Los daños causados por la última plaga de pulgón del guisante han sido totales en muchos lugares y no ha quedado confinada a las regiones productoras de guisante de Maryland, donde las pérdidas ascienden a tres millones de dólares. Por lo que puede comprobarse, es esta la primera temporada de abundancia suficiente para atraer la atención desde el punto de vista económico. Hablando con algunos de nuestros cultivadores principales, he averiguado que el pulgón ya estuvo presente en algunas zonas la temporada pasada, pero no se informó de ello. Que tan enormes pérdidas haya que atribuirlas a una única especie, a una nueva para la ciencia, parece imposible.»

PROTOTIPO DEL ZEPPELIN. «Hasta ahora no se ha publicado una descripción fidedigna de la enorme aeronave que el conde Von Zeppelin está construyendo sobre una balsa anclada en el lago de Constanza, al sur de Alemania. Por fin, el inventor ha vencido su reserva en grado suficiente para permitirnos hacernos cierta idea a propósito del ingenio. La aeronave, en curso de construcción, mide 125 metros de largo. El fuselaje portante es un cilindro de 12 metros de diámetro, con los extremos cónicos, cuyo armazón es de aluminio. Los globos están hechos de tejido de algodón revestido de una sustancia de caucho hermética al gas. El conde Von Zeppelin propulsará su aeronave mediante cuatro hélices de aluminio conectadas a un par de motores de bencina.»

LA EXPO DE PARÍS. «Entre los objetos científicos expuestos en la Exposición de París de 1900 es indudable que el gran telescopio será el de mayor importancia e interés. Acompañamos una ilustración que muestra el aspecto que tendrá el telescopio una vez terminado. Se trata de un tubo de 60 metros de largo provisto de un objetivo de 1,25 metros de diámetro. La imagen de la Luna o las estrellas será enviada por el tubo con ayuda de un siderostato de Foucault, que es un espejo plano móvil de dos metros de diámetro montado en un gran marco de fundición.»



El gran telescopio tal como se presentará en la Exposición de París

...ciento cincuenta años

LOS ENDEBLES AMERICANOS. «En 'Una segunda visita a Estados Unidos' afirma Sir Charles Lyell: 'Sospecho que la raza anglosajona difiere entre Inglaterra y América principalmente en lo que se refiere al clima. Incluso un ser tan cosmopolita como el hombre pudiera requerir más de 225 años antes de que las generaciones sucesivas de progenitores puedan adquirir y trasmitir a su descendencia las nuevas peculiaridades psicológicas que se requieren. Los viajeros ingleses suelen atribuir la más delicada salud de nuestros habitantes a sus hábitos caseros y a la falta de ejercicio. Un inglés acostumbra a reconocerse enseguida en una fiesta por su aspecto más robusto y su tez más clara y rubicunda.»

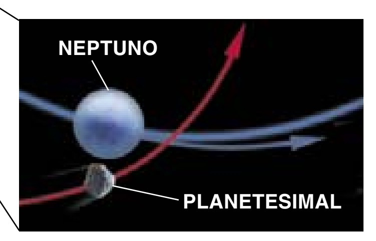
ABECEDARIO Y SCIENTIFIC AMERICAN. «La cuestión de las escuelas libres se decidirá en las próximas elecciones. Hemos conversado sobre el tema con miles de mecánicos y agricultores; en general, se muestran a favor. Nadie puede ser un ciudadano pleno de la República a menos que lea las opiniones de nuestros hombres de estado acerca de distintas cuestiones. Queremos que todos los niños y niñas aprendan al menos a leer, escribir y aritmética, para que de mayores sean capaces de leer *Scientific American*.»

Migración planetaria

Renu Malhotra

¿Se ha mantenido siempre idéntico el sistema solar? Aparecen indicios de que los planetas exteriores abandonaron sus órbitas primitivas para instalarse en las actuales

ORBITA MODIFICADA DE JUPITER
ORBITA DE JUPITER
SOL
ORBITA MODIFICADA DE NEPTUNO
ORBITA DE NEPTUNO
TRAYECTORIA DE UN PLANETESIMAL

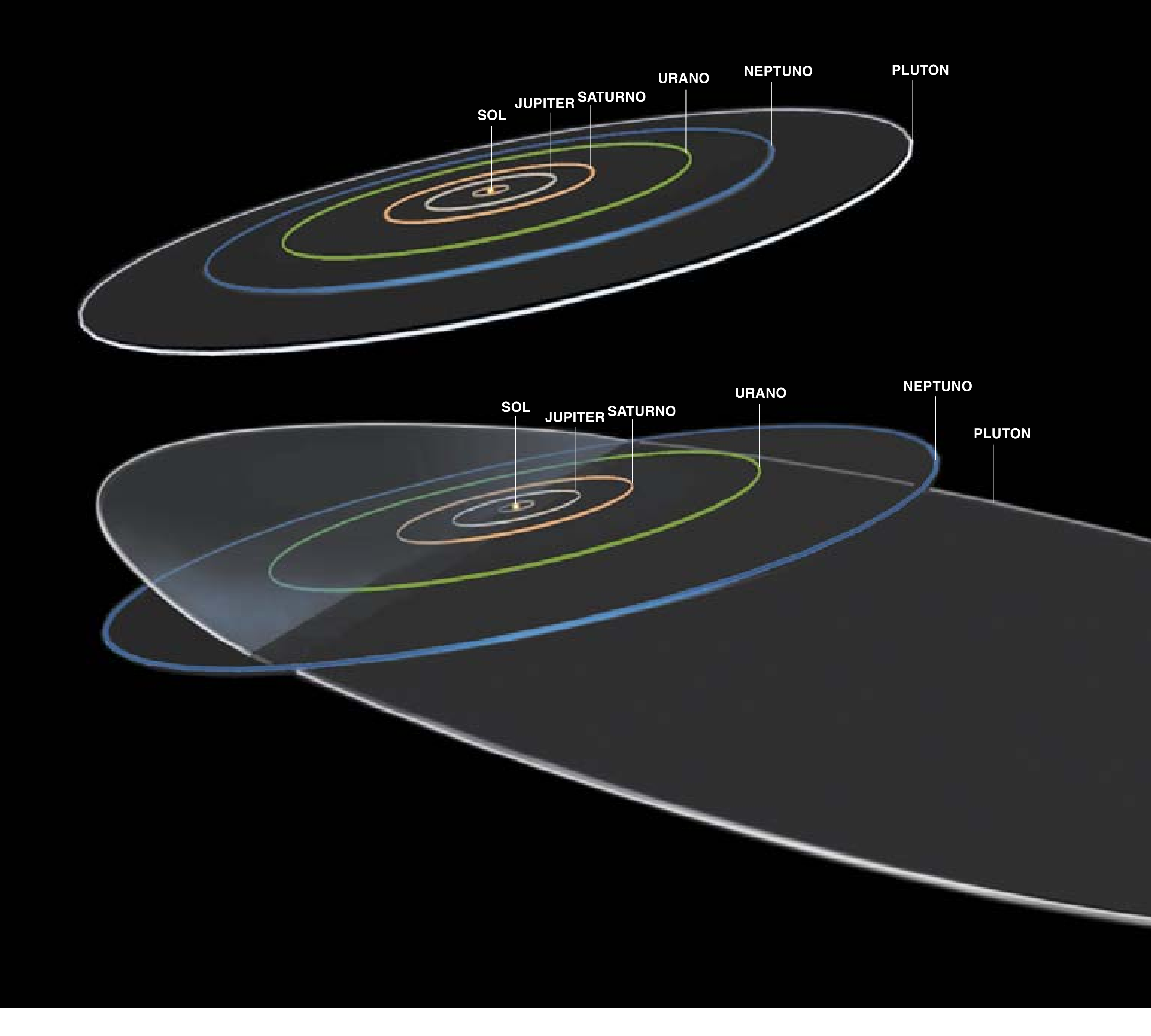


1. UN NEPTUNO RECIEN FORMADO se movía entre un enjambre de pequeños cuerpos de roca y hielo, los planetesimales. Aunque algunos chocaron con él, su gravedad dispersó la mayoría hacia Júpiter, que los expulsó del sistema solar. Con cada una de esas dispersiones Neptuno ganaba energía y su órbita se expandía un poco. Debieron de desplazarlo hasta su órbita actual miles de millones de encuentros similares.



Estamos acostumbrados a observar, en las representaciones del sistema solar, que los planetas sigan una órbita definida alrededor del Sol y guarden una distancia respetable con los vecinos. Llevan en esa noria celeste desde que el hombre tiene constancia de sus movimientos. Los modelos matemáticos nos dicen que tan estable configuración orbital se ha mantenido a lo largo de casi los 4500 millones de años de existencia del sistema solar. De ahí la inclinación lógica a suponer que los planetas "nacieron" en las órbitas que hoy recorren.

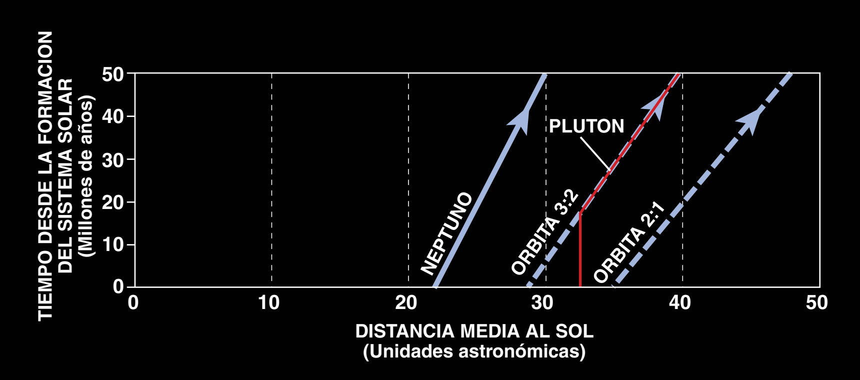
Desde luego, ésa es la hipótesis más simple. Los astrónomos modernos tienden a pensar que las distancias que se observan entre los planetas y el Sol revelan su lugar de origen en el seno de la nebulosa solar, el disco primordial de polvo y gas que engendró al sistema solar. Se han utilizado los radios orbitales de los planetas para deducir la distribución de masas en la nebulosa. A partir de esta información básica, los teóricos han fijado límites a la naturaleza y escala temporal de la formación de los planetas. En consecuencia, gran parte de lo que creemos saber sobre los primeros tiempos del sistema solar se basa en el supuesto de que los planetas se acunaron en sus órbitas actuales.



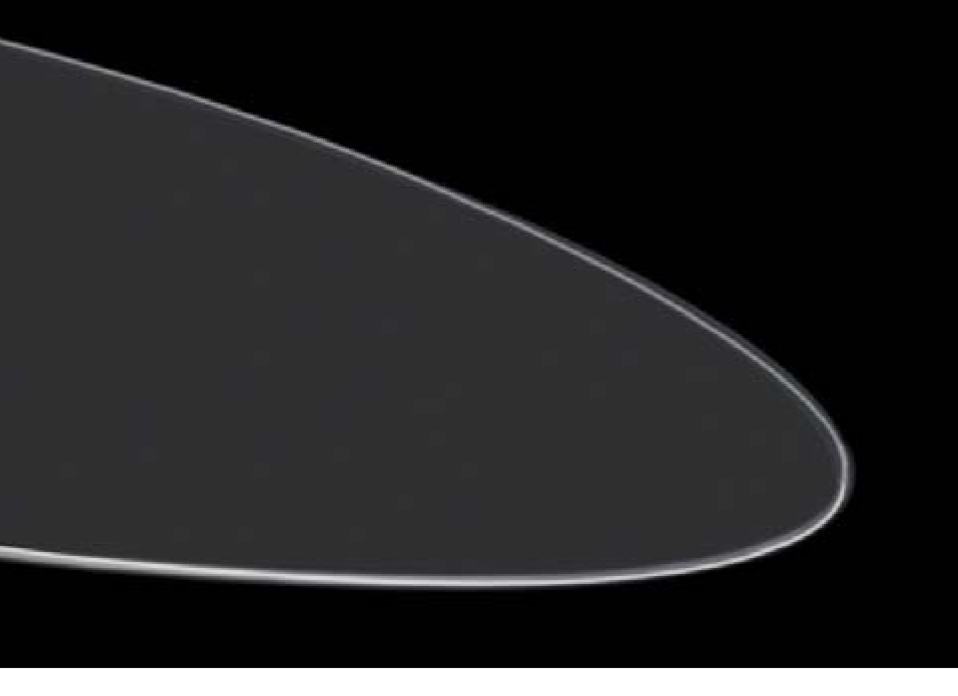
Por otro lado, se acepta sin apenas discrepancia que las órbitas de muchos cuerpos menores del sistema solar —asteroides, cometas y satélites de los planetas— han ido cambiando a lo largo de estos 4500 millones de años; unas harto más que otras. La destrucción en 1994 del cometa Shoemaker-Levy 9, al estrellarse contra Júpiter, constituye una prueba irrefutable del carácter dinámico de algunos cuerpos del sistema solar. Los de menor tamaño —las partículas milimétricas y micrométricas desprendidas de cometas y asteroides— sufren una evolución orbital más gradual; caen poco a poco en el Sol y llueven sobre los planetas que van encontrando en su camino.

Es más, las órbitas de muchos satélites planetarios han experimentado cambios importantes desde su formación. Se calcula, por ejemplo, que la Luna se formó a menos de 30.000 kilómetros de la Tierra, pero su órbita actual se encuentra a 384.000 kilómetros de distancia. En los últimos mil millones de años, nuestro satélite se ha alejado casi 100.000 kilómetros debido a las fuerzas de marea (par gravitatorio) ejercidas por el planeta. Asimismo, las órbitas de numerosos satélites de los planetas exteriores están coordinadas: por ejemplo, el período orbital de Ganímedes, el mayor satélite de Júpiter, es el doble que el de Europa, que a su vez duplica el de Io. Se atribuye esta sincronización tan precisa a una paulatina evolución de las órbitas de los satélites, regida por las fuerzas de marea ejercidas por el planeta que rodean en sus trayectorias.

Tiempo atrás, no se veían motivos para pensar que la configuración orbital de los planetas hubiese variado gran cosa desde su formación. Pero en los últimos cinco años se han producido ciertos avances que inducen a sospechar la migración de los planetas. Con el descubrimiento del cinturón de Kuiper quedó de manifiesto que el sistema solar no terminaba en Plutón. Unos cien mil “planetas menores”, helados, de cien a mil kilómetros de diámetro, y un número aún superior de cuerpos más pequeños, ocupan una región que se extiende desde la órbita de Neptuno



2. LA MIGRACION PLANETARIA queda de manifiesto en estas ilustraciones del sistema solar tal y como era cuando se formaron los planetas (*arriba, a la izquierda*) y tal y como es en la actualidad (*abajo, a la izquierda*). Se cree que la órbita de Júpiter se contrajo ligeramente y se agrandaron las de Saturno, Urano y Neptuno. (La región planetaria interna no se vio afectada apenas por este proceso.) Según esta teoría Plutón nació en una órbita circular, pero Neptuno, al desplazarse hacia el exterior, lo arrastró a una órbita resonante 3:2, con un período proporcional al de Neptuno (*arriba*). La gravedad de éste hizo que la órbita de Plutón se volviera más excéntrica e inclinada con respecto al plano orbital de los demás planetas.



—a unos 4500 millones de kilómetros del Sol— hasta dos veces, por lo menos, esa distancia. La distribución de estos objetos tiene características no aleatorias muy claras que el modelo vigente del sistema solar es incapaz de explicar fácilmente. Los modelos teóricos que abordan el origen de esas propiedades apuntan una posibilidad, apasionante, a saber, que hayan quedado impresas en el cinturón de Kuiper huellas de la historia orbital de los gaseosos planetas gigantes (en concreto, pruebas de que las órbitas de estos planetas se fueron desplazando lentamente tras su formación).

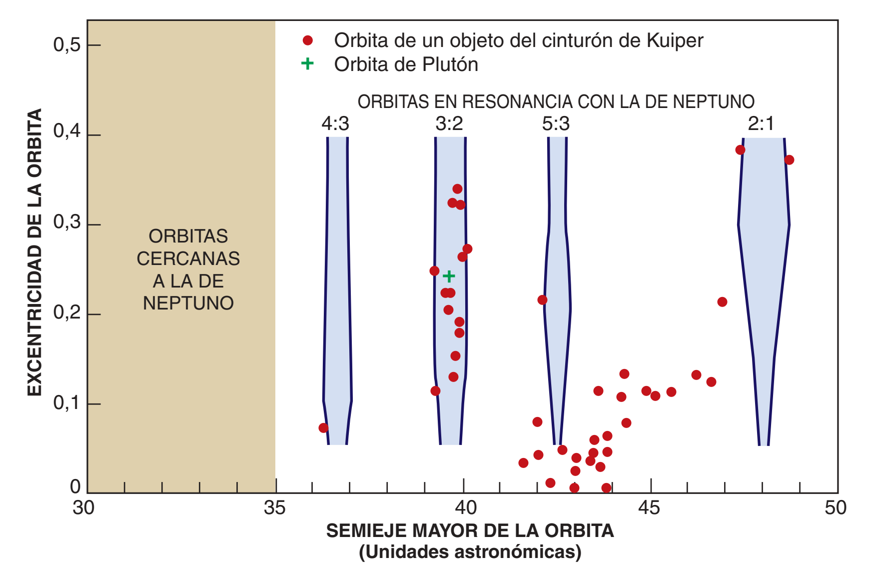
Hacia la migración planetaria apunta también la singular pequeñez de las órbitas de varias compañeras, del tamaño de Júpiter, que cursan en torno a estrellas cercanas de tipo solar. No es fácil entender la formación de estos supuestos planetas a distancias tan cortas de sus estrellas progenitoras. Las hipótesis que se barajan para explicar su origen proponen que el proceso de acreción que los engendró se produjo a distancias más cómodas de sus estrellas maternas —similares a las que median entre Júpiter y el Sol—, para luego trasladarse a sus posiciones actuales.

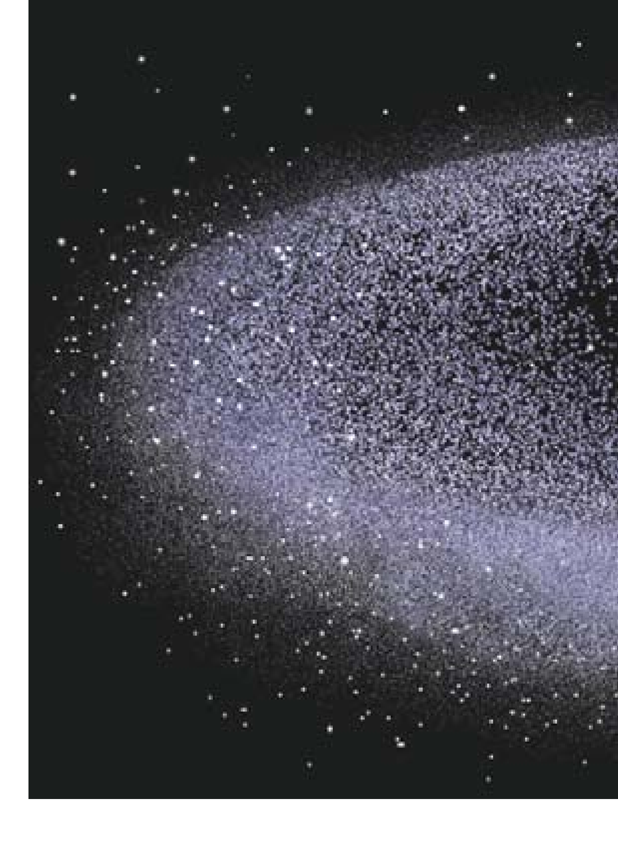
Plutón: ¿rareza o prueba?

Hasta hace tan sólo unos años, los únicos objetos planetarios que se conocían más allá de Neptuno eran Plutón y su satélite, Caronte. Plutón ha venido constituyendo una rareza para las teorías sobre el origen del sistema solar imperantes: su masa es miles de veces inferior a la de los planetas gigantes gaseosos, exteriores, y su órbita difiere sustancialmente de las órbitas bien separadas, casi circulares y coplanares de los ocho planetas principales. Dibuja una órbita excéntrica: durante un giro completo la distancia entre Plutón y el Sol varía entre 29,7 y 49,5 unidades astronómicas (una unidad astronómica, UA, es la distancia entre la Tierra y el Sol, unos 150 millones de kilómetros). Plutón llega a estar 8 UA por encima y 13 UA por debajo del plano medio de las órbitas de los demás planetas. Durante casi 20 de los 248 años de su período orbital está más cerca del Sol que Neptuno.

En los decenios transcurridos desde su descubrimiento en 1930, el misterio de Plutón no ha hecho más que aumentar. Se sabe ahora que la mayoría de las órbitas que cruzan la de Neptuno son inestables (un cuerpo que siguiese una de ellas chocaría con Neptuno o sería expulsado del sistema solar en un intervalo temporal bastante corto, del orden del uno por ciento de la edad del sistema solar). Pero la de Plutón en concreto, aunque cruce la de Neptuno, está a salvo de aproximarse demasiado a este gigante de gas gracias a un fenómeno llamado "libración resonante". Plutón gira dos veces alrededor del Sol en el tiempo que invierte Neptuno en hacerlo tres; por eso, se dice que la órbita de Plutón está en una resonancia de 3:2 con respecto a la de Neptuno. Los movimientos relativos de los dos planetas garantizan que, cada vez que Plutón cruza la órbita de Neptuno, se halle lejos de éste. La distancia que los separa nunca es de menos de 17 UA.

Además, el perihelio de Plutón —el momento de mayor cercanía al Sol— siempre tiene lugar muy por encima del plano de la órbita de Neptuno; así se mantiene la estabilidad orbital de Plutón a largo plazo. Las simulaciones por ordenador de los movimientos orbitales de los planetas exteriores que tienen en cuenta los efectos de sus perturbaciones mutuas indican que la relación actual entre las órbitas de Plutón y Neptuno existe desde hace miles de millones de años y perdurará otros miles de millones de años. Plutón baila con Neptuno una elegante danza cósmica y no ha tropezado con el gigante gaseoso desde que hay sistema solar.





3. LOS OBJETOS DEL CINTURON DE KUIPER ocupan una región toroidal situada más allá de la órbita de Neptuno (*derecha*). La teoría de la migración planetaria predice concentraciones de estos objetos en las órbitas que resuenan con la de Neptuno (*franjas azules en la figura*). Observaciones recientes indican que alrededor de un tercio de los objetos del cinturón de Kuiper, cuyas órbitas ya se conocen (*puntos rojos*), ocupan órbitas resonantes 3:2, similares a la de Plutón (*cruz verde*). Se espera que haya pocos objetos con órbitas muy próximas a la de Neptuno (*área sombreada*).

¿Cómo logró Plutón una órbita tan peculiar? En el pasado este interrogante dio lugar a varias explicaciones conjeturales y *ad hoc* que, por lo general, se basaban en que hubiera habido un encuentro de planetas. Pero últimamente se ha avanzado mucho en el conocimiento de la compleja dinámica de las resonancias orbitales y ahora se comprende que, causantes en el sistema solar de caos y estabilidad excepcional a la vez, representan el papel de doctor Jeckyll y de míster Hyde. A partir de ese conocimiento propuse en 1993 que Plutón nació algo más allá de Neptuno, que al principio tuvo una órbita de baja inclinación, casi circular, similar a la de los demás planetas, y que unas interacciones gravitatorias resonantes con Neptuno lo transportaron a su órbita actual. Una pieza fundamental en esta teoría es que no se suponga ya que los planetas gaseosos gigantes se formaron a sus actuales distancias del Sol. A cambio, establece una época de migraciones orbitales de los planetas en los primeros tiempos del sistema solar; de ello, la insólita órbita de Plutón sería una prueba.

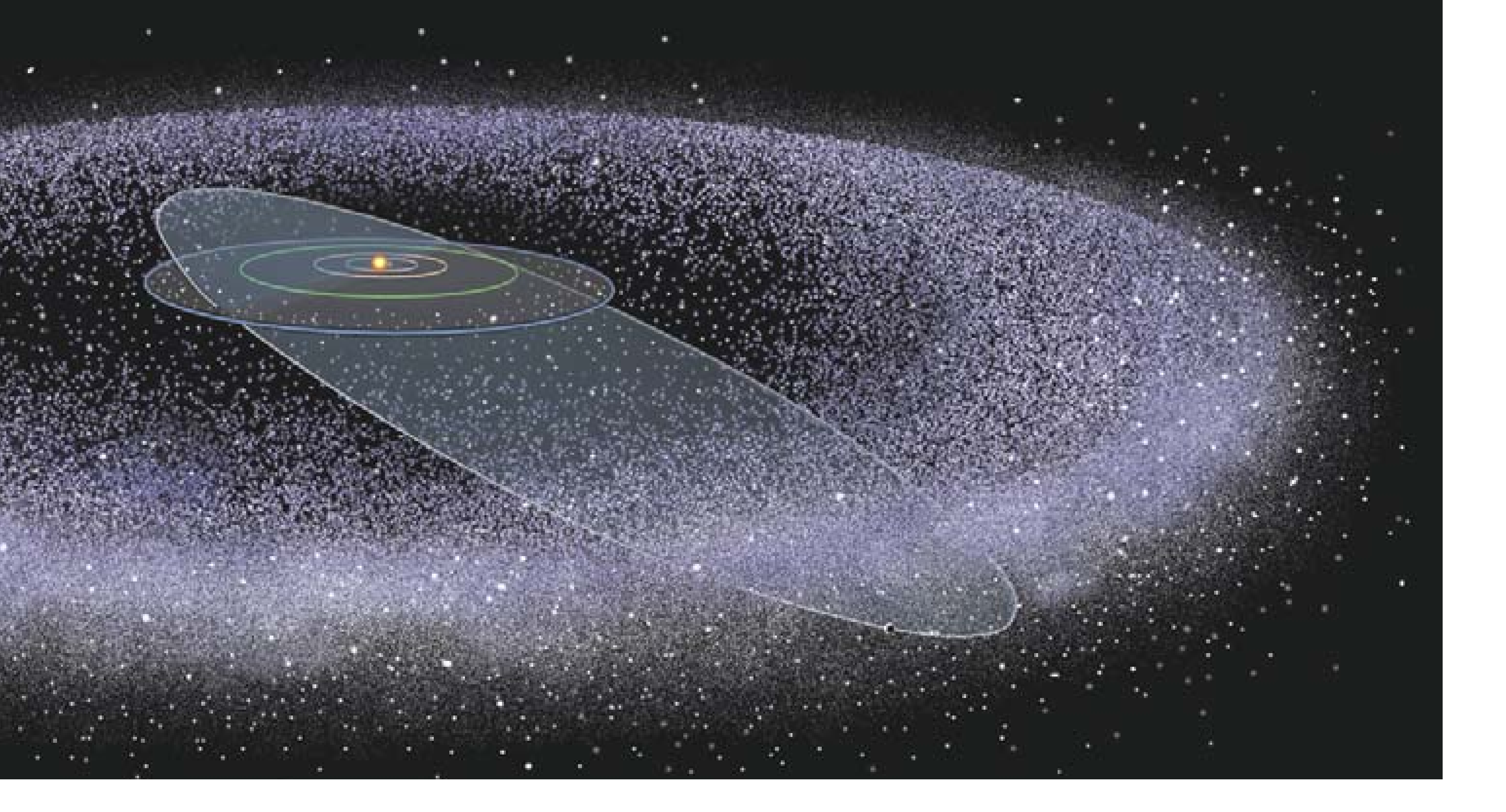
RENU MALHOTRA inició su formación superior en el Instituto de Tecnología de Delhi y se doctoró en física en la Universidad de Cornell en 1988. Tras un período de investigación posdoctoral en el Instituto de Tecnología de California, fue contratada por el Instituto Lunar y Planetario de Houston, donde actualmente se desempeña.

El relato empieza en una etapa en que los procesos de formación planetaria estaban a punto de concluir. Se había casi terminado ya la aglutinación de los gigantes de gas —Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno—, a partir de la nebulosa solar; pero en medio quedaba una población residual de planetesimales, pequeños cuerpos de roca y hielo que en su mayoría medían sólo escasas decenas de kilómetros de diámetro. La evolución posterior del sistema solar, a un ritmo lento, consistió en la dispersión o la agregación de los planetesimales por los planetas mayores. Dado que la dispersión planetaria arrojó gran parte de los restos planetesimales hacia órbitas lejanas o abiertas —expulsando a estos cuerpos del sistema solar—, en las órbitas de los planetas gigantes hubo una pérdida neta de energía orbital y momento angular. Mas, por ser diferentes las masas de cada planeta y sus distancias del Sol, la pérdida no se repartió de modo igual entre los cuatro gigantes.

Fijémonos en la evolución orbital del más exterior de los planetas gigantes, Neptuno, a medida que fue dispersando los planetesimales de su entorno. Al principio, la energía orbital específica media de los planetesimales (es decir, la energía orbital por unidad de masa) era igual a la del propio Neptuno; por tanto, éste ni perdía ni ganaba energía en razón de sus interacciones gravitatorias con tales cuerpos. Sin embargo, el enjambre de planetesimales cercano a Neptuno se quedó más adelante sin los cuerpos de menor energía, que habían pasado a caer dentro del alcance gravitatorio de los otros planetas gigantes. La mayoría de los planetesimales acabó expulsada del sistema solar por Júpiter.

Con el transcurso, pues, del tiempo la energía orbital específica de los planetesimales que se encontraba Neptuno en su camino acabó por ser mayor que la del propio planeta. En las dispersiones que fueron sucediéndose, Neptuno incrementó su energía orbital y migró hacia el exterior. Saturno y Urano ganaron también energía orbital y sus órbitas se expandieron. Júpiter, por contra, perdió energía orbital, merma que sirvió para compensar las ganancias de los otros planetas y planetesimales, y de ese modo se conservó la energía total del sistema. Sin embargo, como Júpiter tiene tanta masa y en un principio su energía orbital y su momento angular eran tan grandes, su órbita sólo se contrajo un poco.

La posibilidad de que se produzcan ajustes tan sutiles en las órbitas de los planetas gigantes fue avanzada



en 1984 por Julio A. Fernández y Wing-Huen Ip, en un artículo que pasó casi inadvertido. Quedó en mera curiosidad, sin que los teóricos de la formación planetaria le dedicaran mayores comentarios, quizá porque no indicaba observaciones que lo respaldasen ni se deducían consecuencias teóricas.

En 1993 formulé mi teoría: a medida que la órbita de Neptuno se expandía lentamente, las que resonaban con ella se dilataron también, hasta el punto de que alcanzaron Plutón (si suponemos que la órbita de éste era inicialmente casi circular y de baja inclinación y caía más allá de Neptuno). Calculé que era muy alta la probabilidad de que un objeto así fuese "capturado" y empujado hacia el exterior con esas órbitas resonantes durante la migración de Neptuno; a medida que se desplazase hacia fuera su excentricidad orbital e inclinación crecerían debido a la distorsión gravitatoria resonante causada por Neptuno. (Este efecto es análogo al aumento en la amplitud del movimiento de un columpio cuando se le dan pequeños empujones con una frecuencia que coincida con la suya natural.) La excentricidad máxima resultante nos daría, por tanto, una medida directa de la magnitud de la migración de Neptuno. Según esta teoría, la excentricidad orbital de 0,25 de Plutón significa que Neptuno se desplazó hacia el exterior al menos 5 UA. Más tarde, con la ayuda de simulaciones por ordenador, elevé esta cifra a 8 UA y calculé que, para explicar la inclinación de la órbita de Plutón, la escala temporal de la migración debió de ser de varias decenas de millones de años.

Naturalmente, si Plutón hubiese sido el único objeto existente más allá de Neptuno, no habría podido verificarse esta explicación de su órbita, por convincente que resultase en muchos aspectos. Sin embargo, la teoría predice aspectos específicos de la distribución orbital de los cuerpos del cinturón de Kuiper, los restos del disco primordial de planetesimales que se extienden allende Neptuno. Siempre y cuando los cuerpos mayores del primitivo cinturón de Kuiper fuesen lo bastante pequeños como para que las perturbaciones que causaran a los otros objetos del cinturón no llegasen a ser apreciables, el mecanismo dinámico del barrido por resonancia actuaría no sólo sobre Plutón, sino también sobre todos los objetos transneptunianos, cuyas órbitas perturbaría asimismo. Como consecuencia, deberían hallarse concentraciones importantes de objetos con órbitas excéntricas en las dos resonancias más intensas de Neptuno: 3:2 y 2:1. Esas órbitas son elípticas, con semiejes mayores de 39,5 UA y 47,8 UA, respectivamente. (La longitud del semieje mayor coincide con la distancia media entre el objeto y el Sol.)

Deberían encontrarse concentraciones más modestas de cuerpos neptunianos en otras resonancias, como la 5:3. La población de objetos existente más cerca de Neptuno que de la órbita resonante 3:2 hubo de quedar diezmada por la resonancia que barre esa zona, teniendo en cuenta además que las perturbaciones creadas por Neptuno desestabilizarían las órbitas de los cuerpos que subsistiesen. En cuanto a los planetesimales que se aglutinaran a una distancia del Sol superior a las 50 UA, cabe esperar que permaneciesen estables y que sus órbitas se atuvieran aún a la distribución primigenia.

Afortunadamente, las observaciones recientes de los objetos del cinturón de Kuiper, o KBO (del inglés "Kuiper Belt Objects"), permiten contrastar la teoría. Se han descubierto más de 174 KBO desde mediados de 1999. La mayoría presenta períodos orbitales de más de 250 años; el seguimiento realizado cubre, pues, menos del uno por ciento de sus órbitas. No obstante, se han podido determinar, con una fiabilidad razonable, los parámetros orbitales de unos 45 de los KBO conocidos. Su distribución orbital no sigue un patrón uniforme de órbitas casi circulares y de baja inclinación, tal y como cabría esperar de una población de planetesimales que no hubiese sido perturbada y conservara su estado original. Antes bien, encontramos pruebas de peso de la existencia de intervalos y concentraciones en la distribución. Una fracción importante de los KBO viaja en órbitas resonantes excéntricas de 3:2, similares a

¿Por fin un sistema planetario?

R. Paul Butler y sus colaboradores del Observatorio Anglo-australiano anunciaron en abril de 1999 el descubrimiento del que parece ser el primer caso conocido de un sistema planetario, con varios objetos de masa similar a la de Júpiter, en órbita alrededor de una estrella de tipo solar. (Antes se habían detectado sistemas con un solo astro compañero de la masa de Júpiter.) La estrella es Hypsilon Andromedae, situada a unos 40 años luz de nuestro sistema solar, con una masa ligeramente superior a la del Sol y tres veces más luminosa que él.

EL SISTEMA de Hypsilon Andromedae contiene, según se cree, tres cuerpos de masa similar a la de Júpiter en órbita alrededor de la estrella principal (*arriba*). Sus órbitas teóricas son mucho más cerradas que la de Júpiter en nuestro sistema solar (*abajo*).

Estos astrónomos afirman que del análisis de sus observaciones se desprende que Hypsilon Andromedae tiene tres compañeros. La masa del objeto más interno es al menos un 70 por ciento de la de Júpiter; se mueve en una órbita casi circular a tan sólo 0,06 UA —unos nueve millones de kilómetros— de la estrella. El compañero más externo tiene al menos cuatro veces la masa de Júpiter y describe órbitas muy excéntricas, con un radio medio de 2,5 UA, o sea, la mitad del radio de la órbita de Júpiter. El objeto intermedio duplica la masa de Júpiter; su órbita, moderadamente excéntrica, tiene un radio promedio de 0,8 UA.

De confirmarse este hallazgo, la arquitectura de ese sistema presentaría interesantes problemas y oportunidades para los modelos teóricos de la formación y evolución de los sistemas planetarios. Un grupo de expertos en dinámica (entre los que me cuento) ha logrado determinar que la configuración orbital de este supuesto sistema es, en el mejor de los casos, estable sólo circunstancialmente. La estabilidad dinámica del sistema mejoraría mucho si no existiera el compañero intermedio. Es algo digno de tener en cuenta, ya que los indicios observacionales de su existencia son más débiles que para los otros dos.

El sistema de Hypsilon Andromedae parece contradecir todos los mecanismos teóricos que podrían inducir la migración interior de los planetas gigantes desde su cuna en órbitas lejanas. Si las interacciones entre disco y protoplaneta hubiesen causado la contracción orbital, lo más probable sería que el planeta de mayor masa fuera el que antes naciese, así que deberíamos encontrarlo a una distancia menor de la estrella; sucede lo contrario en el sistema de Hypsilon Andromedae. Si sólo son reales los compañeros de los extremos, el sistema podría ser un ejemplo del modelo de dispersión planeta-planeta en el que dos planetas de gran masa se desplazan a órbitas próximas, luego uno dispersa al otro gravitatoriamente y al final acaban uno describiendo una órbita pequeña casi circular y el otro una excéntrica y lejana. Este orden de cosas presenta la dificultad de que el compañero de mayor masa debería evolucionar hacia la órbita pequeña y el de menor masa hacia la grande; justo lo contrario es lo que se observa en el sistema Hypsilon Andromedae.

¿Podría ser este sistema una especie de híbrido de las dos hipótesis? Es decir: una contracción orbital causada

la de Plutón; no se advierten apenas KBO en órbitas interiores respecto a la de 3:2, lo cual es coherente con las predicciones de la teoría del barrido resonante.

Aun así, queda por despejar una incógnita: ¿son comparables en número los KBO de la resonancia 2:1 con los de la 3:2, como dicta la teoría de la migración planetaria? ¿Cuál es la distribución orbital a distancias aún mayores del Sol? En la actualidad, el censo del cinturón de Kuiper no ha avanzado lo suficiente para resolver la cuestión. No obstante, en la Nochebuena de 1998 el Centro de Investigación de Planetas Menores de Cambridge, Massachusetts, anunció la identificación del primer KBO con una órbita resonante 2:1 con respecto a Neptuno. Dos días más tarde proclamaba la detección de otro KBO así. Ambos presentan grandes excentricidades orbitales, y puede que sean miembros de una población importante de KBO con órbitas similares. Se les había considerado objetos en órbitas resonantes 3:2 y 5:3, respectivamente, pero las observaciones realizadas el año pasado dejaron pocas dudas de que las identificaciones originales estaban equivocadas Este episodio pone de manifiesto la necesidad de realizar un seguimiento continuo de los KBO conocidos y cartografiar su distribución orbital. También debemos ser conscientes de los peligros que se corren al querer interpretar un conjunto insuficiente de datos relativos a las órbitas KBO.

Para resumir, aunque todavía no pueden descartarse otras explicaciones, la distribución orbital de los KBO respalda de manera cada vez más clara la teoría de la migración planetaria. Los datos sugieren que Neptuno se originó a unos 3300 millones de kilómetros del Sol y a continuación se alejó unos 1200 millones de kilómetros, casi un 30 por ciento del radio de su órbita actual. Para Urano, Saturno y Júpiter la magnitud de la migración fue más pequeña, quizá de un 15, 10 y 2 por ciento respectivamente; las estimaciones para estos planetas son más inciertas ya que, al contrario que Neptuno, no pudieron dejar una huella directa en la población del cinturón de Kuiper.

La mayor parte del movimiento migratorio tuvo lugar a lo largo de un período inferior a los cien millones de años. Es mucho si se compara con la escala temporal de la formación de los planetas —que seguramente no duró más de diez millones de años—, pero poco con respecto a los 4500 millones de años del sistema solar. En otras palabras, la migración de los planetas se desarrolló

por las interacciones disco-protoplaneta en el caso del objeto interior y una dispersión gravitatoria mutua en el de los otros dos compañeros. Quizás intervengan procesos de formación y evolución totalmente distintos, como la fragmentación de la nube de gas protoestelar que se cree produce sistemas multiestelares y compañeras enanas marrones.

Si sólo las compañeras interior y exterior son reales, el sistema sería similar desde el punto de vista estructural a los clásicos sistemas de tres estrellas formados por una binaria muy apretada y una tercera estrella en órbita excéntrica. Abundan las conjeturas sobre el sistema Hypsilon Andromedae. Con más observaciones y un análisis más profundo, recabaremos pruebas sólidas del número de compañeros de la estrella, sus masas y sus parámetros orbitales.

Los métodos empleados para realizar estos descubrimientos, no han sido por ahora capaces de detectar sistemas planetarios como el nuestro porque las alteraciones del movimiento estelar debidas a planetas del tamaño de la Tierra que describen órbitas ceñidas —o de planetas del tamaño de Júpiter en órbitas más distantes — caen por debajo del límite observable. Es prematuro extraer conclusiones acerca de la frecuencia astronómica de los planetas de tipo terrestre. A buen seguro, nuestros conocimientos acerca del origen de los objetos identificados recientemente como compañeros de estrellas de tipo solar evolucionarán, para mejor comprender nuestro sistema solar.

—R. M.

en los primeros tiempos del sistema solar y últimos de la constitución de los planetas. La masa total de los planetesimales dispersados fue del orden del triple de la de Neptuno. Surge la pregunta de si, en una fase temprana, no se producirían cambios orbitales de mayor intensidad; por ejemplo, cuando el disco primordial de gas y polvo contenía más materia y quizá muchos protoplanetas en órbitas vecinas que competían en el proceso de acreción.

¿Existen otros sistemas planetarios?

A principios de los años ochenta, la investigación teórica de Peter Goldreich, Scott Tremaine y otros llegaba a la conclusión de que las fuerzas gravitatorias existentes entre un protoplaneta y el disco de gas circundante, más las pérdidas de energía producidas por las fuerzas viscosas del medio gaseoso, podían conducir a intercambios de energía y momento angular muy importantes entre el protoplaneta y el disco. Con un ligero desequilibrio entre los pares de fuerzas ejercidas sobre el protoplaneta por la parte del disco que quedase en el interior de su órbita y las ejercidas por la materia existente justo más allá de ésta, podría haber cambios rápidos y drásticos en la órbita del planeta. De nuevo, poca atención se le prestó en su momento a esta posibilidad teórica. Al tener como muestra un único sistema solar, los teóricos de la formación de los planetas siguieron aceptando que nacieron en sus órbitas actuales.

Sin embargo, en los últimos cinco años la búsqueda de planetas extrasolares ha proporcionado posibles señales de migración planetaria. La medición de los reveladores balanceos de las estrellas próximas —situadas a menos de 50 años luz de nuestro sistema solar— ha aportado indicios de la existencia de más de una docena de objetos de una masa del estilo de la de Júpiter que describen órbitas sorprendentemente pequeñas alrededor de estrellas de la secuencia principal. El primer supuesto planeta fue detectado en 1995 en órbita alrededor de 51 Pegasi por Michel Mayor y Didier Queloz, del Observatorio de Ginebra, mientras buscaban estrellas binarias. Su hallazgo fue confirmado rápidamente por Geoffrey W. Marcy y R. Paul Butler, del Observatorio Lick. A la altura de junio de 1999 había identificada una veintena de posibles planetas extrasolares, la mayoría descubiertos por Marcy y Butler, gracias a programas de búsqueda que han estudiado casi 500 estrellas cercanas de tipo solar durante los últimos diez años. La técnica empleada en el rastreo —medición del corrimiento Doppler de las líneas espectrales de las estrellas para determinar las variaciones periódicas de las velocidades estelares— tan sólo fija un limite inferior a las masas de los cuerpos compañeros de las estrellas. La mayoría de los planetas candidatos tienen masas mínimas de al menos una masa de Júpiter y órbitas con radios de menos de 0,5 UA.

¿Qué relación existe entre estos objetos y los planetas de nuestro sistema solar? Según el modelo comúnmente aceptado acerca de la formación planetaria, la agregación de los planetas gigantes de nuestro sistema solar se produjo en dos etapas. En la primera la convergencia de planetesimales formó un núcleo protoplanetario; a continuación, la fuerza gravitatoria de este núcleo atrajo de la nebulosa circundante un gran envoltorio gaseoso. Este proceso debió de concluir unos diez millones de años después de la formación de la nebulosa solar, tal y como se deduce de las observaciones astronómicas que establecen la longevidad de los discos protoplanetarios que rodean a las estrellas jóvenes de tipo solar.

A menos de 0,5 UA de distancia de una estrella no hay masa bastante en el disco primordial para que se condense un núcleo protoplanetario sólido. Además, no está claro que fuese capaz un protoplaneta que describiera una órbita muy cerrada de atraer tanto gas ambiental como para crear un envoltorio de la magnitud del que rodea a Júpiter. Hay una razón geométrica elemental: un objeto que describe una órbita pequeña viaja por un volumen de espacio menor que uno cuya órbita sea mayor. Además, el disco de gas es más caliente cerca de la estrella y, por tanto, es menos probable que se condense y cree un núcleo protoplanetario. Estas consideraciones hablan en contra de la formación de planetas gigantes en órbitas de período muy corto.

Varios teóricos han sugerido que los presuntos planetas gigantes extrasolares podrían haberse formado a distancias de varias UA de la estrella y, luego, haber emigrado hacia el interior. La explicación de esta migración orbital se la disputan tres mecanismos. Dos se basan en interacciones entre el disco y el protoplaneta que alejarían mucho al planeta de su lugar de nacimiento mientras siguiese existiendo un disco de gran masa.

Con las interacciones entre disco y protoplaneta propuestas por Goldreich y Tremaine, el planeta queda inmerso en el flujo de gas que se dirige hacia la estrella y va agregándose a ésta, con lo que, o el planeta se libera del gas al acercarse a la estrella, o acaba precipitándose en ella. El segundo mecanismo es la interacción con un disco de planetesimales en vez de con un disco de gas: un planeta gigante incrustado en un disco planetesimal de masa muy grande intercambiaría energía y momento angular con el disco por medio de la dispersión gravitatoria y las interacciones resonantes, y la órbita se iría retirando hacia el borde interno del disco, a pocos radios estelares de la estrella.

El tercer mecanismo es la dispersión de grandes planetas formados

en órbitas (o desplazados hacia ellas) demasiado próximas entre sí como para permitir una estabilidad a largo plazo. En este proceso, los resultados finales son impredecibles; por lo general, ambos planetas tomarían órbitas muy excéntricas. En algunos casos, uno de los planetas dispersados pasaría fortuitamente a ocupar una órbita excéntrica que se acercase tanto a la estrella en el momento de mayor aproximación, que la fricción de marea terminaría por convertir la órbita en circular; mientras tanto, el otro planeta sería dispersado hasta ocupar una órbita excéntrica distante. Todos estos mecanismos pueden dar lugar a una amplia gama de radios y excentricidades orbitales de los planetas supervivientes.

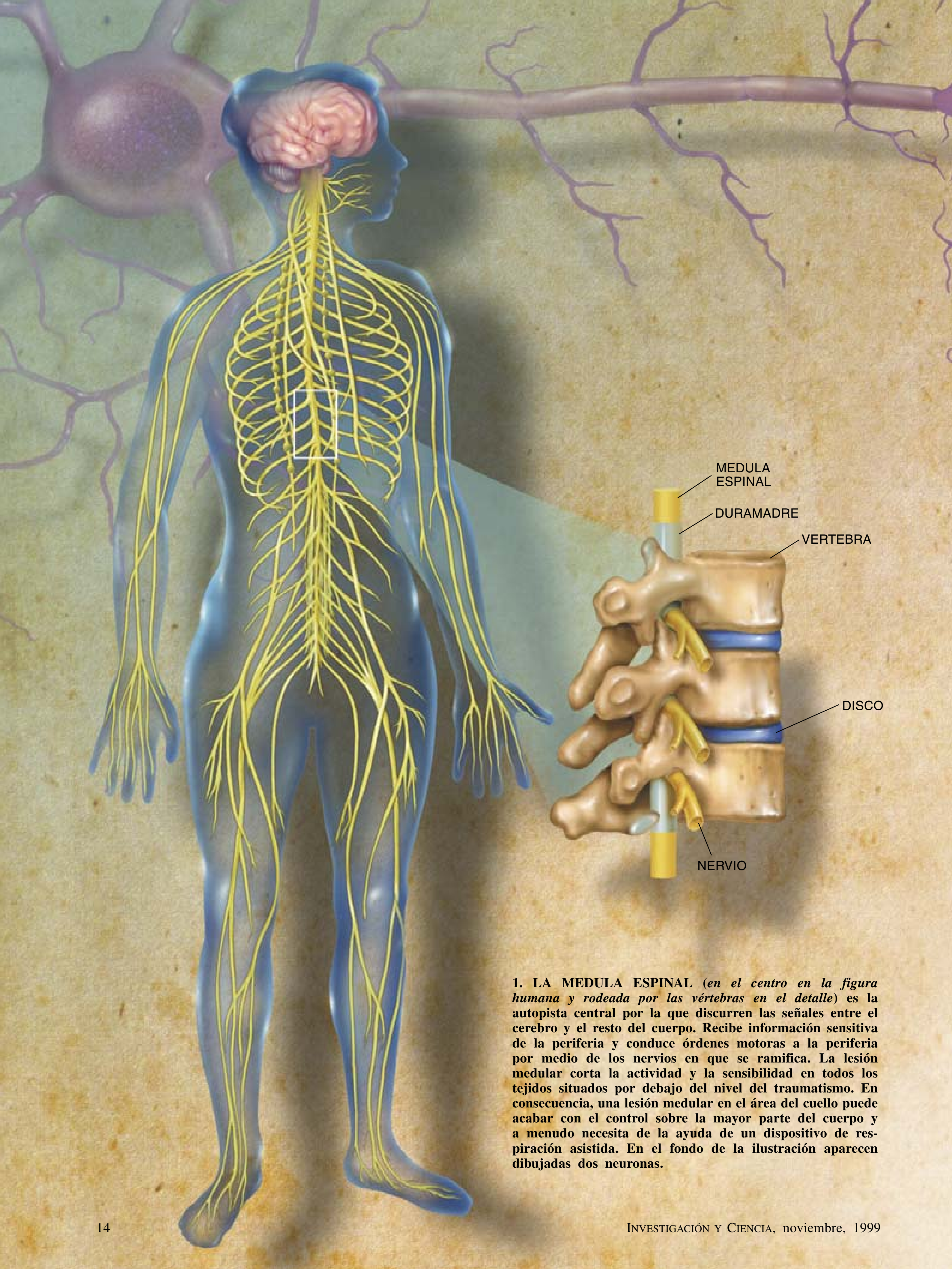
Estas ideas apenas si bosquejan el modelo estándar de la formación de los planetas. Ponen en entredicho la idea comúnmente aceptada de que alrededor de las estrellas de tipo solar los discos protoplanetarios evolucionan hasta formar sistemas planetarios regulares, así el nuestro. Es posible que la mayoría de los planetas nazcan en configuraciones inestables y que la migración posterior conduzca a resultados muy dispares en cada uno de los sistemas, dependiendo en gran medida de las propiedades iniciales del disco. Para dilucidar qué relación hay entre las compañeras extrasolares descubiertas recientemente y los planetas de nuestro sistema solar se necesita avanzar más en la teoría y en la observación. Con todo, una cosa es segura: la idea de que las órbitas de los planetas pueden sufrir grandes cambios ya no nos va a abandonar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEWTON'S CLOCK: CHAOS IN THE SOLAR SYSTEM. Ivars Peterson. W.H. Freeman and Company, 1993.

DETECTION OF EXTRASOLAR GIANT PLANETS. Geoffrey W. Marcy y R. Paul Butler en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, volumen 36, pág. 57-98; 1988.

DYNAMICS OF THE KUIPER BELT. Renu Malhotra et al., en *Protostars and Planets IV*. Coordinado por V. Mannings et al. University of Arizona Press (*en prensa*). Disponible en http://astro.caltech.edu/vgm/ppiv/ preprint.html en la World Wide Web.



1. LA MEDULA ESPINAL (*en el centro en la figura humana y rodeada por las vértebras en el detalle*) es la autopista central por la que discurren las señales entre el cerebro y el resto del cuerpo. Recibe información sensitiva de la periferia y conduce órdenes motoras a la periferia por medio de los nervios en que se ramifica. La lesión medular corta la actividad y la sensibilidad en todos los tejidos situados por debajo del nivel del traumatismo. En consecuencia, una lesión medular en el área del cuello puede acabar con el control sobre la mayor parte del cuerpo y a menudo necesita de la ayuda de un dispositivo de respiración asistida. En el fondo de la ilustración aparecen dibujadas dos neuronas.

Reparación de la médula espinal

Hasta hace poco casi una esperanza infundada, ahora parece plausible cierto grado de restauración de las lesiones de médula espinal

John W. McDonald y el Consorcio de Investigación de la Fundación Christopher Reeve para el Estudio de la Parálisis

Para el gimnasta chino Sang Lan, la causa fue una caída de cabeza, muy divulgada por los medios de comunicación, durante los entrenamientos para los Juegos de Buena Voluntad de 1998. Para Richard Castaldo, de Littleton, las balas; para el que fuera jugador de fútbol americano Dennis Byrd, un encontronazo en 1992 en el terreno de juego; y para la pequeña Samantha Jennifer Reed, una caída en la infancia. No importa la causa, el resultado de una lesión traumática grave de la médula espinal es, demasiado a menudo, el mismo: parálisis total o parcial y pérdida de sensibilidad por debajo del nivel de la lesión.

Diez años atrás los médicos no disponían de medios para limitar esta incapacidad, fuera de estabilizar la médula para prevenir lesiones ulteriores, tratar las infecciones e indicar una terapia rehabilitadora que sacara el máximo partido de las posibilidades remanentes. No podía confiarse en que la médula se autorregenerara. A diferencia del sistema nervioso periférico, el sistema nervioso central (médula espinal y cerebro) no se regenera bien. Contados eran los esperanzados en que la situación cambiara.

Hasta que, en 1990, un ensayo clínico en el que participaron numerosos centros de investigación reveló que el esteroide metilprednisolona podía preservar alguna función motora y sensitiva, si se administraba en dosis elevadas dentro de las ocho horas siguientes a la lesión traumática medular. Por vez primera se comprobaba que un método terapéutico reducía el trastorno funcional causado por el traumatismo de la médula. Las mejoras fueron modestas, pero el éxito estimuló una búsqueda de terapéuticas adicionales. Desde entonces, muchos investigadores —entre ellos nosotros— han buscado nuevas ideas para el tratamiento en el marco de la investigación sobre las causas que motivan que una lesión inicial pusiera en marcha el desarrollo de lesiones añadidas en la médula espinal, con el fracaso ulterior de la autorreconstrucción del tejido.

Explicaremos aquí la aplicación del rápido incremento de nuestros conocimientos al auxilio de quienes sufren lesiones de la médula. Otros grupos de trabajo vienen también diseñando estrategias cuyo objetivo no es tanto reparar cuanto compensar las consecuencias negativas de la lesión medular. En los dos últimos años, por ejemplo, la entidad oficial norteamericana que entiende de la idoneidad de alimentos y fármacos (*Food and Drug Administration*) ha aprobado dos sistemas electrónicos que regulan la actividad de los músculos mediante el envío de señales eléctricas a través de electrodos implantados. Un sistema recupera determinados movimientos de la mano (tomar una taza o coger una pluma) en pacientes que conservan la movilidad del hombro; otro sistema restaura cierto grado de control sobre la vejiga y el intestino.

En otro planteamiento diferente se pretende que los pacientes recuperen la capacidad prensil de objetos. Los cirujanos identifican los tendones que vinculan músculos paralizados del antebrazo con huesos de la mano, los desconectan de tales músculos y los ponen en conexión con músculos del brazo regulados por áreas de la médula situadas por encima del foco traumático y, por tanto, bajo control voluntario. Además, muchos clínicos sospechan que el inicio precoz de la terapéutica rehabilitadora —ejercicios de las extremidades en cuanto la columna vertebral se encuentra estabilizada— refuerza la función motora y sensitiva en las extremidades. Estas presunciones no han pasado por una comprobación

rigurosa en seres humanos, aunque estudios en animales parecen darles crédito.

Así funciona la médula espinal

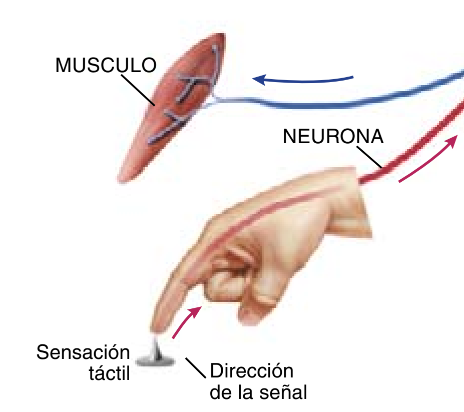
El órgano que recibe tamaña atención no mide más de dos centímetros y medio de grosor. Pese a lo cual, es la autopista por donde circulan las comunicaciones entre el cerebro y el resto del cuerpo. Las unidades de comunicación son las células nerviosas (neuronas), que constan de un cuerpo celular bulboso (donde reside el núcleo), una arborización de dendritas detectoras de señales y un axón, que se extiende desde el cuerpo celular y conduce las señales hasta otras células. Los axones se ramifican en sus extremos y pueden mantener conexiones, o sinapsis, con muchas células a un tiempo. Algunos axones atraviesan la longitud entera de la médula.

Blanda y de consistencia gelatinosa, la médula espinal contiene dos grandes sistemas de neuronas. De estos sistemas, las vías motoras descendentes controlan los músculos de los órganos internos y los músculos estriados; también ayudan a modular las actividades del sistema nervioso autónomo, que regula la presión arterial, la temperatura y la respuesta circulatoria del organismo al estrés. Las vías descendentes comienzan en las neuronas cerebrales; éstas envían señales eléctricas hacia niveles específicos, o segmentos, de la médula espinal. Las neuronas situadas en dichos segmentos portan entonces los impulsos fuera, más allá de la médula.

El otro gran sistema de neuronas —el sistema ascendente, el de las vías sensitivas— transmite señales sensoriales, recibidas de las extremidades y órganos, a segmentos específicos de la médula espinal y, desde aquí,

NERVIOS
FUNCIONES AFECTADAS
NUMERACION VERTEBRAS
C2
Médula cervical
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
Respiración (C1-4) y movimientos de la cabeza y cuello (C2)
Ritmo cardíaco (C4-6) y movimientos del hombro (C5)
Movimientos de la muñeca y el codo (C6-7)
Movimientos de la mano y los dedos (C7-D1)
D1
Médula dorsal
D1
D2
D3
D4
D5
D6
D7
D8
D9
D10
D11
D12
Tono simpático (D1-12) (incluida la regulación de la temperatura) y estabilidad del tronco (D2-12)
Médula lumbar
L1
Médula sacra
L1
L2
Eyaculación (D11-L2) y movilidad de la cadera (L2)
L3
Extensión de la rodilla (L3)
L4
S1
L5
Movilidad del pie (L4-S1) y flexión de la rodilla (L5)
S1
S2
S3
S4
S5
Erección del pene (S2-S4) y actividad vesical e intestinal (S2-S3)

2. CUATRO TRAMOS de la médula espinal —el cervical, el dorsal, el lumbar y el sacro— y sus nervios correspondientes sirven a áreas específicas del cuerpo. En general, los nervios cervicales se relacionan con el cuello, las extremidades superiores y el aparato respiratorio; los nervios dorsales controlan la postura y órganos internos; los nervios lumbares hacen funcionar las extremidades inferiores; y los nervios sacros, que regulan la vejiga urinaria y el intestino, desempeñan un papel en la función sexual.



al cerebro. Las señales se originan en células especializadas (“transductoras”), tales como los sensores de la piel que detectan cambios en el medio ambiente, o en células que monitorizan el estado de los órganos internos. La médula espinal contiene también circuitos neuronales (tales como los implicados en los reflejos y en ciertos aspectos de la marcha) que pueden ser activados por la llegada de señales sensoriales, sin orden proveniente del cerebro, aunque puedan ser influenciadas por mensajes procedentes del cerebro.

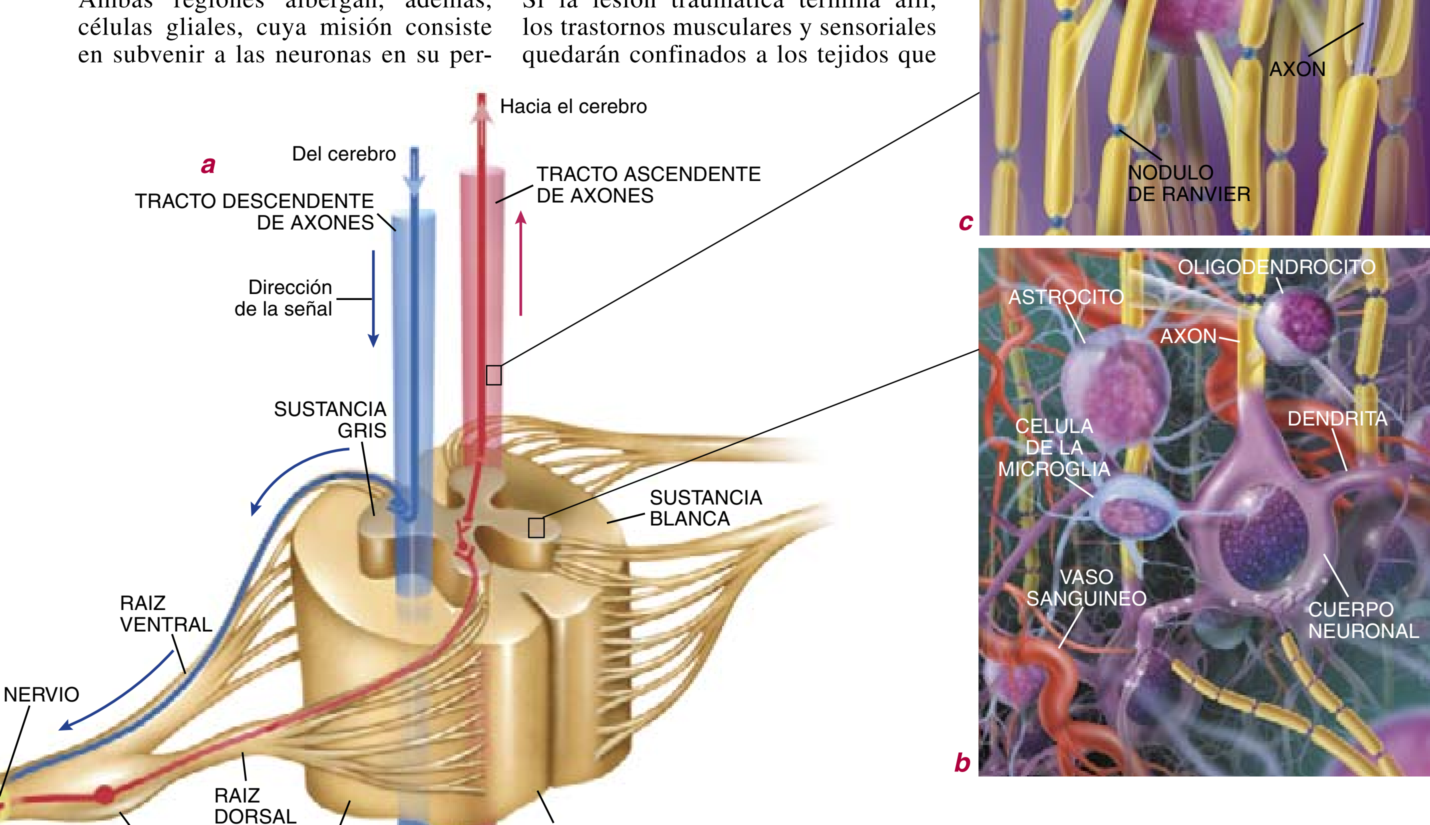
En el tronco de la médula espinal, los cuerpos celulares residen en una masa central gris, con forma de mariposa, que se extiende cuan largo es el cordón. Las fibras de los axones ascendentes y descendentes viajan dentro de la sustancia blanca, así denominada porque los axones se encuentran rodeados de mielina, un material aislante de color blanco. Ambas regiones albergan, además, células gliales, cuya misión consiste en subvenir a las neuronas en su pervivencia y operación. La glía abarca astrocitos estrellados, microglía (pequeñas células que se asemejan a los componentes del sistema inmunitario) y oligodendrocitos, productores de mielina. Cada oligodendrocito mieliniza simultáneamente unos cuarenta axones.

La naturaleza precisa de una lesión de la médula espinal varía de una persona a otra. Con todo, estas lesiones traumáticas presentan ciertos hechos comunes.

El momento de la lesión

Cuando una caída u otro tipo de fuerza producen una fractura o una luxación de la columna, los cuerpos vertebrales que, en condiciones normales, rodean y protegen a la médula espinal pueden aplastarla, liquidando mecánicamente a los axones. En ocasiones, sólo se daña la sustancia gris del área traumatizada. Si la lesión traumática termina allí, los trastornos musculares y sensoriales quedarán confinados a los tejidos que envían o reciben señales (“input”) de las neuronas situadas en el área afectada en la médula, sin que ocurran trastornos funcionales por debajo del nivel de la lesión.

Imaginemos que se interesa sólo la sustancia gris en una lesión del segmento cervical 8 (C8), porción de médula espinal donde se originan los nervios correspondientes a la raíz C8; cuando tal ocurra, se paralizarán las manos sin que se afecte la marcha o el control sobre el intestino y la



3. UN SEGMENTO DE LA MEDULA ESPINAL (*a*) pone de manifiesto la sustancia gris, en forma de mariposa, rodeada de un anillo de sustancia blanca. Los principales componentes de la sustancia gris (*b*) son cuerpos neuronales, aunque también se encuentran células gliales (astrocitos y microglía) y vasos sanguíneos. La sustancia blanca (*c*) contiene astrocitos y vasos sanguíneos, aunque consta en su mayor parte de axones (proyecciones neuronales conductoras de señales), que cursan arriba y abajo la médula espinal, y de oligodendrocitos, que son células gliales que envuelven a los axones con una mielina aislante de color blanco. Los tractos axonales que ascienden por el cordón (*rojo en a*) conducen mensajes sensitivos recibidos de cualquier parte del cuerpo; los tractos descendentes (*azul*) llevan órdenes motoras a los músculos.

Objetivos terapéuticos

Una lesión traumática de la médula afecta, en un principio, a una zona pequeña. Pero esta lesión dispara un proceso secundario que extiende la destrucción hística. Muchos axones terminan seccionados o desprovistos de parte de su recubrimiento aislante de mielina, lo que les incapacita para propagar las señales más allá de las áreas afectadas (*diagrama).*

En condiciones normales, los axones no se regeneran, ni recuperan mielina. Aunque lo hicieran, se encontrarían con barreras infranqueables para una reparación completa. En primer lugar, una cavidad impenetrable y llena de líquido, un quiste formado allí donde las células han muerto y se han cortado los axones. El quiste aparece, a menudo, rodeado por "cicatrices" gliales; éstas son aglomeraciones de células gliales activadas que, si bien no constituyen ningún tapón físico, liberan o extienden sustancias que inhiben el crecimiento de los axones. En muchos casos de lesiones traumáticas, sólo sigue funcionando una fracción restringida de axones en la periferia de la médula.

El tratamiento de estas lesiones podría incluir, en el futuro, una combinación de varias terapéuticas; más abajo aportamos una lista indicativa. La mayoría de los tratamientos se aplicarían en la propia región dañada. Limitar la destrucción será más fácil que repararla. Y una vez estabilizado el daño, costará menos compensar la desmielinización que estimular la autorregeneración de los axones y el establecimiento de sinapsis apropiadas.

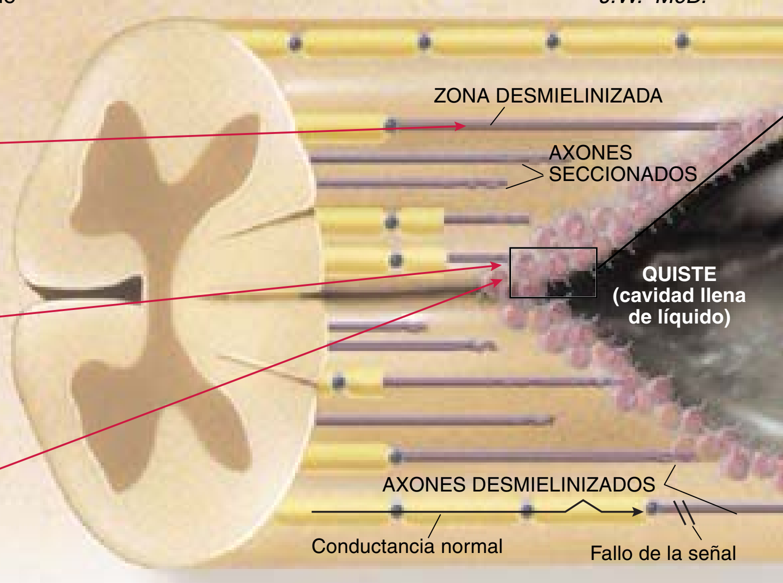
—J.W. McD.



COMPENSAR LA DESMIELINIZACION
- Administrar sustancias químicas que prevengan que los impulsos nerviosos se disipen en las áreas desmielinizadas
- Aportar agentes que estimulen a los oligodendrocitos supervivientes a remielinizar los axones
- Reemplazar los oligodendrocitos perdidos

PROMOVER LA REGENERACION AXONAL
- Administrar agentes que bloquean a los inhibidores naturales de la regeneración
- Administrar sustancias que inducen la regeneración axonal

DIRIGIR LOS AXONES A SUS PROPIOS OBJETIVOS
- Aportar moléculas que sirvan de guía hacia los lugares correctos
- Administrar sustancias que induzcan a las células supervivientes a producir o distribuir moléculas guía



vejiga. No se emitirán ni se recibirán señales de los tejidos conectados con los nervios C8, aunque los axones que conducen señales por arriba y por abajo en la sustancia blanca que rodea a este segmento de sustancia gris siguen funcionando.

¿Qué ocurre cuando se destruye toda la sustancia blanca en el mismo segmento medular? En este caso, la lesión interrumpirá las señales verticales, pues bloqueará los mensajes que se originan en el cerebro para llegar más allá del área lesionada y detendrá el flujo hacia el cerebro de las señales sensitivas que proceden de áreas distales a la lesión medular. Esta persona quedará paralizada en sus manos y en sus extremidades inferiores y perderá el control de la micción y de la defecación.

Por desgracia, el traumatismo inicial es sólo el comienzo del problema. La lesión mecánica inicial dispara una segunda oleada de lesiones, una oleada que, en los minutos, horas y días subsiguientes, agranda progresivamente la lesión y extiende la afectación funcional. De entrada, esa extensión secundaria tiende a proceder a lo largo de la sustancia gris, antes de interesar la sustancia blanca. La destrucción termina por abarcar varios segmentos medulares, por encima y por debajo del foco traumático inicial.

El resultado final es una situación compleja de destrucción. Los axones dañados se convierten en muñones inútiles, sin conexión alguna, cuyos cabos terminales, seccionados, degeneran. A menudo, muchos axones permanecen intactos, pero se tornan inservibles por la pérdida de la mielina aislante. Donde había neuronas, otras células y axones es ahora una cavidad llena de líquido, un quiste. Y las células gliales proliferan anormalmente, acumulándose en cicatrices gliales. El quiste y las cicatrices forman conjuntamente una barrera formidable para cualquier axón seccionado que pudiera intentar regenerarse y conectar con las células que en algún momento había inervado. Algunos axones quizá persistan indemnes, mielinizados, con capacidad para transportar señales arriba y abajo, pero, a menudo, su número es muy pequeño para transmitir órdenes útiles al cerebro o a los músculos.

Lo primero, limitar el daño

Si hubiera que lograr la reversión completa de todas esas alteraciones, las perspectivas de tratamientos aparecerían sombrías. Mas, salvando tal vez la actividad normal de sólo un 10 por ciento de la dotación estándar de axones, podrían andar quienes ahora quedan privados de tal capacidad. La mera reducción del nivel de la lesión en un solo segmento (alrededor de un centímetro y medio) implica ya un salto importante en calidad de vida. Los pacientes con una lesión de C6 pierden el control de sus brazos, conservan alguna habilidad para mover los hombros y flexionan sus codos. Pero los individuos con una

CICATRIZ GLIAL

AXONES SECCIONADOS

INHIBIDORES DE LA REGENERACION AXONAL

QUISTE

CELULAS GLIALES ACTIVADAS

AXONES CON LA MIELINA INTACTA

ZONA DE LA LESION ORIGINAL

PREVENIR LA EXPANSION DE LA DESTRUCCION INICIAL
- Aportar agentes que bloqueen la llamada lesión excitotóxica de las células supervivientes
- Administrar sustancias que eviten el suicidio celular o bien que refuercen las defensas de las células estresadas

CREAR PUENTES
- Implantar (en el quiste) tejido que sirva de andamiaje para los axones y estimule su crecimiento

REEMPLAZAR LAS CELULAS MUERTAS
- Implantar células capaces de producir todos los tipos de células perdidas
- Administrar sustancias que puedan inducir a las células indiferenciadas, presentes en la médula, a reemplazar las células muertas

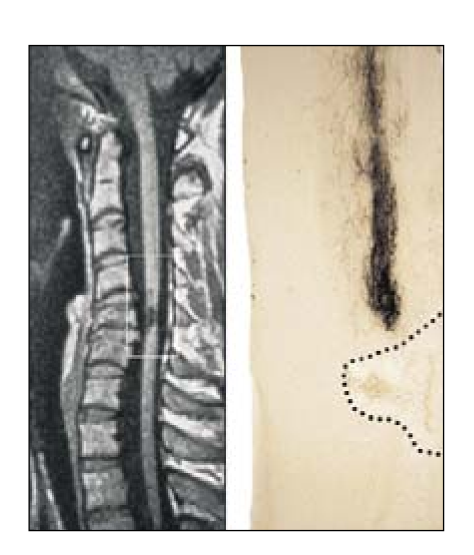
lesión más baja —C7— pueden mover las articulaciones de los hombros y los codos y extender las muñecas; con entrenamiento y, en ocasiones, una transposición tendinosa, pueden hacer algún uso de brazos y manos.

Puesto que a la destrucción inicial sigue una lesión importante, resulta fundamental aclarar el mecanismo de formación del proceso destructivo secundario y bloquearlo. Las lesiones secundarias o añadidas a la lesión original son el resultado de muchos mecanismos interactivos.

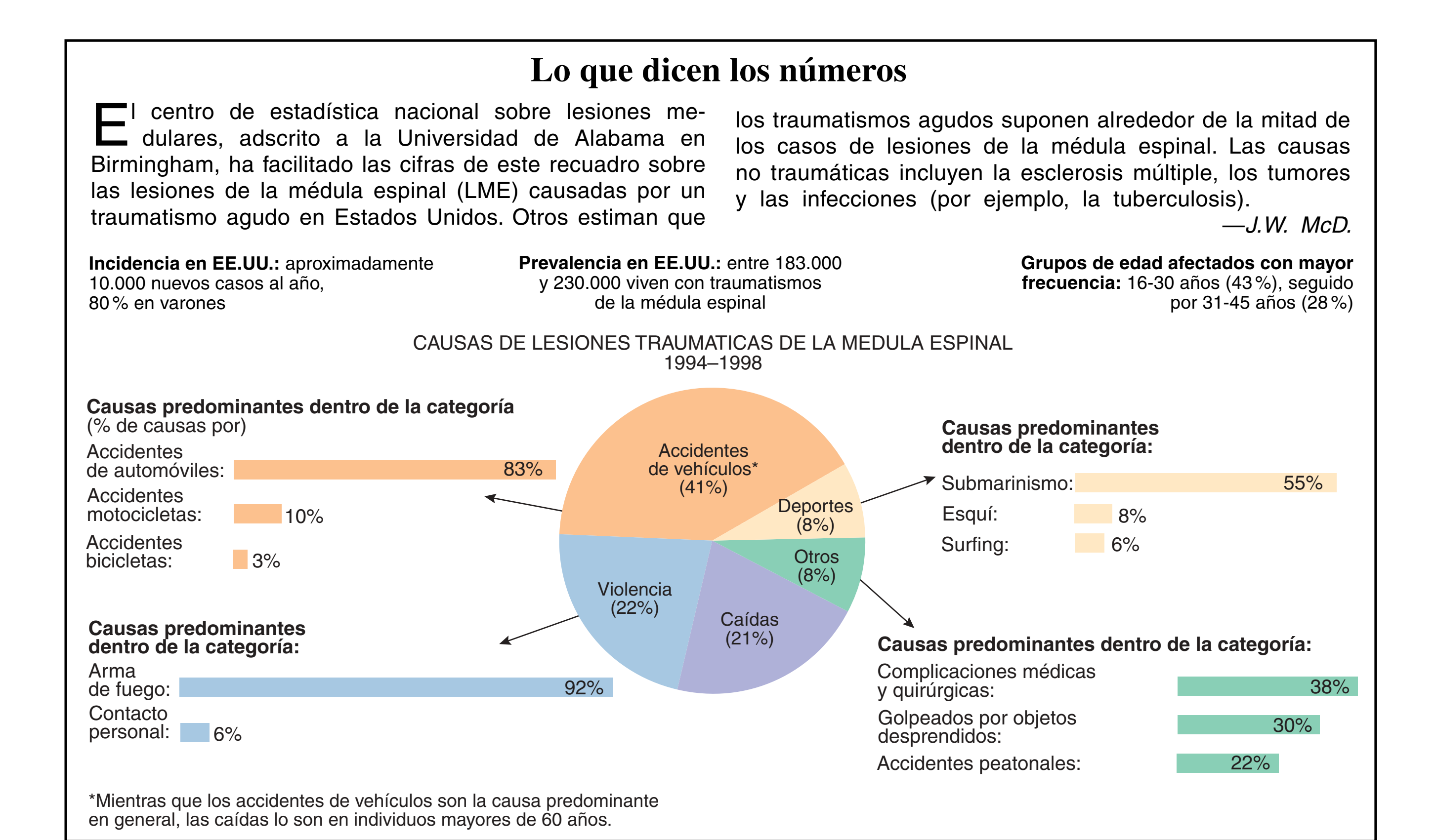
Minutos después del traumatismo aparecen pequeñas hemorragias de vasos sanguíneos desgarrados; la médula espinal aumenta de volumen por edema. La lesión de los vasos y la hinchazón medular dificulta el aporte normal de oxígeno y nutrientes a las células, lo que provoca que muchas de ellas mueran, desprovistas de nutrientes.

Mientras tanto, las células dañadas, los axones y los vasos sanguíneos liberan sustancias tóxicas que actúan sobre las células vecinas. Una de estas sustancias químicas, en particular, activa el proceso de excitotoxicidad, sumamente destructivo. En la médula espinal sana los extremos de los axones secretan cantidades mínimas de glutamato. Cuando esta sustancia se liga a los receptores de las neuronas que son su objetivo, provoca la excitación de las mismas. Pero si neuronas medulares, axones o astrocitos sufren daños, liberan entonces glutamato a raudales. Esas concentraciones ingentes hiperexcitan las neuronas vecinas, induciéndolas a admitir oleadas de iones que desencadenan una cascada de fenómenos destructivos en el interior celular, incluida la producción de radicales libres. Estas moléculas extraordinariamente reactivas atacan a las membranas y otros componentes de las neuronas sanas, provocándoles la muerte.

Hasta hace cosa de un año, creíase que la excitotoxicidad, observada también después de un accidente



4. QUISTE de médula lesionada. La cavidad que formó en una persona con lesión cervical (*izquierda*) aparece obscurecida (*recuadro*). En una rata (*derecha*) la cavidad está limitada por una línea de puntos; se distinguen también los axones dañados que terminan, de modo indebido, fuera del quiste (*líneas oscuras*).



cerebrovascular, era letal sólo para las neuronas. Nuevos hallazgos sugieren que acaba, asimismo, con los oligodendrocitos (células productoras de mielina). Este efecto podría explicar la desmielinización incluso de los axones no seccionados; por eso, tras el traumatismo medular, se tornan incapaces de conducir impulsos nerviosos.

El prolongado proceso inflamatorio, marcado por la llegada de ciertas células del sistema inmunitario, ayuda a exacerbar estos efectos. Puede durar días. En condiciones normales, las células inmunitarias se encuentran en la sangre, sin poder entrar en los tejidos del sistema nervioso central. Sí penetran allí donde se han seccionado traumáticamente los vasos sanguíneos. A medida que estas células y la microglía se activan en respuesta al traumatismo, liberan más radicales libres y otras sustancias tóxicas.

La metilprednisolona, la primera sustancia farmacológica que limita la extensión del foco lesional de la médula espinal en los seres humanos, puede actuar a través de la reducción del edema, de la inflamación, de la liberación de glutamato y de la acumulación de radicales libres. Los detalles precisos acerca de cómo estas acciones farmacológicas pueden ayudar a los pacientes no son conocidos con exactitud.

En la investigación de laboratorio, realizada con animales sometidos a lesiones experimentales de la médula, se ha observado que la metilprednisolona bloquea la respuesta celular ante el exceso de glutamato, lo que comporta el freno de los fenómenos destructivos. Los agentes que, de modo selectivo, bloquean los receptores del glutamato de la clase AMPA, abundante en los oligodendrocitos y en las neuronas, se muestran harto eficaces en la limitación de la extensión final de una lesión y en las discapacidades asociadas. Se han ensayado ya ciertos antagonistas de los receptores AMPA en pruebas clínicas, en el marco de una terapia del accidente cerebrovascular agudo; de aquí a unos años podríamos disponer de fármacos relacionados, prestos para su ensayo en pacientes con traumatismos de médula.

En la médula espinal traumatizada, la necrosis podría ser culpable de una fracción notable de la pérdida celular inicial; en ese proceso, las células son víctimas pasivas de "asesinato". Junto a ella, en los últimos años, los neurobiólogos han descubierto en la médula otra forma más activa de muerte celular, el "suicidio". Días o semanas después del traumatismo inicial, una oleada de apoptosis suele barrer los oligodendrocitos, hasta cuatro segmentos más allá de la localización del foco traumático inicial. Con este hallazgo se han abierto nuevas puertas a la terapia de protección. Las ratas a las que se les administran, después de un traumatismo de la médula espinal, sustancias que inhiben la apoptosis, retienen más capacidad ambulatoria que los roedores sin tratar.

En los últimos años, se han ido identificando factores neurotróficos, que promueven la supervivencia de las neuronas y de la glía. Se estudia hasta qué grado una sustancia afín, el GM-1 gangliósido (Sygen), confina la lesión medular en humanos. A fin de cuentas, las medidas para limitar la lesión secundaria habrán de incluir, a buen seguro, sustancias varias, aplicadas en momentos diferentes, que bloqueen mecanismos específicos de muerte en distintas poblaciones celulares.

La mejor terapéutica no se detendría en restringir la zona de lesión, sino que buscaría repararla. Un componente clave de la reparación sería estimular la autorregeneración de los axones dañados: inducir su elongación y trabar nueva conexión con células dianas apropiadas.

Aunque las neuronas del sistema nervioso central de los mamíferos

JOHN W. McDONALD y el resto de los miembros del Consorcio de Investigación de la Fundación Christopher Reeve para el Estudio de la Parálisis trabajan juntos desde 1995. McDonald enseña neurología y rehabilitación en la facultad de medicina de la Universidad de Washington y dirige el servicio de lesiones medulares en el Hospital Barnes-Jewish de San Luis. Los coautores son Aileen J. Anderson y Carl W. Cotman, de la Universidad de California en Irvine; Ira B. Black, de la Escuela de Medicina Robert Wood Johnson; Christian Broesamle, Isabel Klusman y Martin E. Schwab, de la Universidad de Zurich; Mary Bartlett Bunge y Giles W. Plant, de la facultad de medicina de la Universidad de Miami; Dennis W. Choi, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington; Fred H. Gage y Philip J. Horner, del Instituto Salk; Daniel J. Liebl y Luis F. Parada, del hospital clínico de la Universidad del Sudoeste de Texas, y Chan Roonprapunt y Wise Young, de la Universidad de Rutgers.

adultos acostumbran a fracasar en la regeneración de los axones dañados, no se debe tal fallo a una propiedad intrínseca de las células. La culpa la tiene un entorno hostil. En cualquier otro lugar del cuerpo, en la médula espinal inmadura y en el cerebro, las neuronas regeneran sus axones con presteza; asimismo, los experimentos animales han demostrado que un ambiente adecuado puede inducir que los axones de la médula espinal crezcan.

Inducir la regeneración

Un inconveniente del entorno que rodea a la médula espinal estriba en la sobreabundancia de moléculas que inhiben la regeneración de los axones, algunas de ellas en la mielina. Quienes descubrieron estos inhibidores vinculados con la mielina han producido el anticuerpo IN-1, molécula que bloquea o neutraliza la acción de los inhibidores, de donde su nombre y siglas. Han demostrado también que la infusión, en la médula espinal lesionada de la rata, de IN-1 derivada del ratón puede conducir a la regeneración de algunos axones interrumpidos. Y cuando se han interrumpido las vías que controlan la actividad de las extremidades anteriores, los animales tratados recuperan alguna movilidad en estas extremidades, mientras que los dejados al margen del tratamiento no la recuperan. Nuestro sistema inmunitario humano acabaría con el anticuerpo de roedores; por eso la investigación trabaja en una versión humana del mismo anticuerpo para someterla a ensayo clínico.

Se han descubierto otras muchas moléculas inhibidoras, algunas producidas por los astrocitos, y cierto número de moléculas que residen en la matriz extracelular (el andamiaje armado entre células). Ante semejante muestrario parece probable que se necesitarán terapéuticas combinadas para contrarrestar o bloquear la producción de múltiples sustancias inhibidoras de la regeneración axonal.

Además de levantar los “frenos” que actúan sobre la regeneración axonal, deberían aportarse sustancias que promovieran de una manera activa el crecimiento de los axones. La búsqueda de factores de ese tipo comenzó con los estudios del desarrollo del sistema nervioso. Hace decenios que la ciencia aisló el factor de crecimiento nervioso (NGF), un factor neurotrófico que mantiene la supervivencia y el desarrollo del sistema nervioso periférico. Se vio más tarde que el factor formaba parte de una familia de proteínas que incrementa la supervivencia neuronal y favorece el crecimiento de los axones. Se han identificado varias familias más de factores neurotróficos con similares capacidades; así, la molécula neurotrofina-3 (NT-3), que estimula selectivamente el crecimiento de los axones descendentes por la médula desde el cerebro.

Para nuestra fortuna, las neuronas adultas mantienen su capacidad de responder a las señales, procedentes de tales factores, que instan la regeneración axonal. Mas, a la vista está, la producción natural de tales sustancias resulta insuficiente para las cantidades necesarias en la reparación de la médula. En las semanas posteriores al traumatismo, la síntesis de algunos compuestos disminuye manifiestamente, en vez de avivarse. El incremento artificial de las concentraciones de esas sustancias, lo corroboran numerosos estudios realizados en animales, estimula la regeneración. En pacientes con accidente cerebrovascular se han sometido a ensayo clínico el factor básico de crecimiento de los fibroblastos y otros factores neurotróficos que promueven la regeneración. Aunque no se ha ensayado ninguno todavía en la regeneración tras lesión medular en seres humanos, sí se han compro-



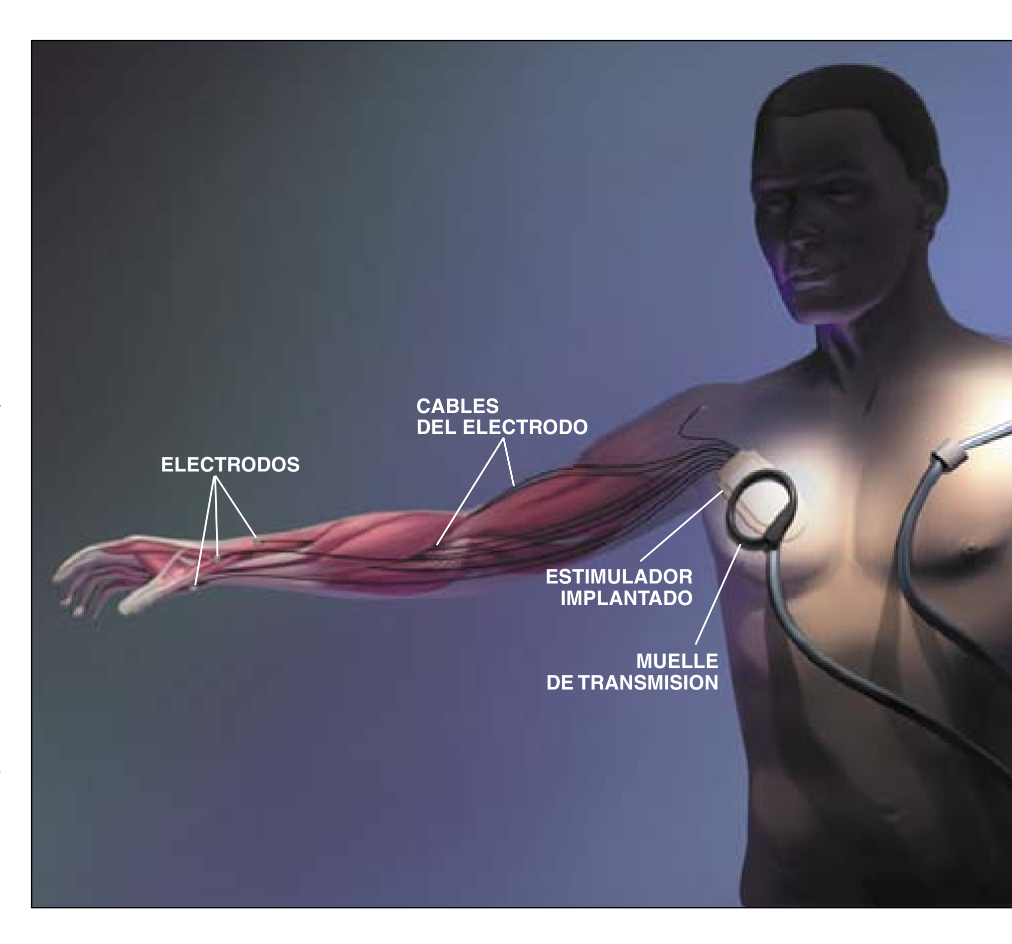
5. DENNIS BYRD sufrió una lesión incompleta de la médula espinal cerca de la base del cuello en un choque con un compañero de equipo durante un partido de fútbol americano celebrado en 1992 (*abajo*). Hoy (*arriba*) camina cojeando. En su recuperación ha podido contar con la rápida administración de metilprednisolona, el único fármaco aprobado para limitar la extensión de la lesión. También recibió una sustancia experimental (Sygen) de valor desconocido.

bado muchos en animales, requisito previo obligado.

Quienes sueñen con la aplicación terapéutica de factores neurotróficos tendrán que asegurarse de que estos agentes no aumentan el dolor, una complicación a largo plazo del traumatismo medular. Muchas son las causas del dolor. Una es el brote de axones allí donde no les corresponde (quizás en un fallido intento de dirigirse al foco lesional) y su conexión inapropiada con otras células. A veces el cerebro se equivoca y toma por señales dolorosas los impulsos que transcurren a través de estos axones. Los factores neurotróficos pueden, en teoría, agravar este problema; pueden, también, provocar que los circuitos medulares del dolor y las células de la piel sensibles al mismo se tornen hipersensibles.

Iniciado el crecimiento de los axones, habrá que guiarlos hacia sus propios objetivos, las células con las que se hallaban en un comienzo conectadas. Pero, ¿cómo? La biología del desarrollo embrionario ha venido en nuestro auxilio.

Durante el desarrollo, los axones en crecimiento son llevados a sus eventuales objetivos por moléculas que operan en la zona apical del axón, en su cono de crecimiento. Se han descubierto, sobre todo en los últimos cinco años, numerosas sustancias que intervienen en el proceso. El grupo de las netrinas se liberan o reparten entre neuronas o células gliales. Estas sustancias atraen a los axones para que crezcan en determinadas direcciones y no en otras. En los componentes fijos de la matriz extracelular encuentran moléculas guía adicionales. Ciertas moléculas de la matriz extracelular se enlazan con moléculas específicas (moléculas de adhesión celular) en los conos de crecimiento, para así facilitar el anclaje o puntos de agarre de los axones que progresan. Durante el desarrollo, las moléculas guía necesarias van presentándose a los conos de crecimiento en secuencias características.



Conexiones correctas

Nadie sabe todavía cómo colocar las señales de tráfico necesarias en los puntos adecuados. Pero algunas observaciones nos sugieren ya que podemos facilitar el proceso de regeneración aportando un subgrupo de moléculas indicadoras del objetivo. En breve, una muestra de netrinas y de componentes de la matriz extracelular. Las sustancias preexistentes en la médula podrían suministrar las demás señales de tráfico exigidas.

Con un planteamiento muy distinto se mueve la línea de investigación que se propone, para solucionar el problema de la regeneración de los axones en la dirección correcta, establecer un puente en el hiato creado por la lesión traumática. Se trata de dirigir la pauta de desarrollo axonal hacia su destino instalando un conducto por donde cursen los axones o algún otro tipo de andamiaje o armazón que proporcione soporte físico a las fibras en su empeño de atravesar la zona quística del traumatismo, impenetrable de suyo. El andamiaje sirve también de fuente de sustancias químicas promotoras del crecimiento.

Es el camino seguido por el equipo que implantó tubos rellenos de células de Schwann en el hiato producido por la extirpación de una parte de la médula espinal en roedores. Optaron por células de Schwann, que son la glía del sistema nervioso periférico, porque encierran muchos atributos que favorecen la regeneración de los axones. En experimentos con animales, estos injertos estimulan cierto desarrollo de los axones dentro de los tubos.

Como puente se han empleado también células gliales olfatorias, recubiertas de una vaina. Son exclusivas de las fibras nerviosas que se dirigen de la nariz a los bulbos olfatorios del cerebro. Cuando se implantan esas células en la médula de una rata cuyos tractos descendentes han sido seccionados, los apósitos celulares estimulan la regeneración parcial de los axones a lo largo del injerto. El trasplante de la glía olfativa, junto con células de Schwann, conduce a un crecimiento más extenso de los axones.

En teoría, podría realizarse una biopsia en un paciente para extraer la necesaria glía olfatoria. Y, una vez establecidas las propiedades que capacitan —a esas u otras células— para devenir escoltas competentes de los axones en progreso, la ciencia podría manipular genéticamente otro tipo de células, proporcionándoles las combinaciones requeridas de propiedades promotoras del crecimiento.

Otras células sometidas a ingeniería genética para servir en esa labor de puente son los fibroblastos, habituales en el tejido conectivo y la piel. Se les ha manipulado para que sintetizaran la molécula neurotrófica NT-3 y, luego, trasplantado en la médula



Avances en electrónica

¿Podrían implantarse electrodos que estimularan los nervios enmudecidos por la lesión de la médula espinal y, en consecuencia, podría recuperarse la función de determinados músculos paralizados? La verdad es que ya existen tales dispositivos. Dos en concreto que parecen incrementar la autonomía del paciente acaban de conseguir la aprobación de la autoridad sanitaria estadounidense. Con uno, las personas que conservan la movilidad del hombro pueden usar la mano (*véase la ilustración*). Determinados movimientos del hombro opuesto activan un detector que envía señales a una unidad de control externo. Esta unidad, a su vez, transfiere las señales a un muelle implantado de transmisión conectado a cables que terminan en músculos seleccionados de brazo y mano.

El otro dispositivo, que ha comenzado a emplearse en Gran Bretaña, se propone que el control de la micción torne al paciente. Con un transmisor externo se activa una suerte de marcapasos implantado que envía señales eléctricas a los nervios de la vejiga. En respuesta, la vejiga y su esfínter se contraen; la relajación posterior del esfínter permite la evacuación de la vejiga. El sistema estimula también los nervios intestinales y ayuda a la evacuación del intestino.

Entre otros dispositivos, operativos o sujetos todavía a investigación, hay sistemas que posibilitan la posición erecta del paciente (para que sea más fácil la transferencia entre silla de ruedas, cama y un cuarto de baño), promueven el ejercicio del corazón y los pulmones, la asistencia respiratoria, la inducción de la tos, la mejora de la circulación o la reducción de la espasticidad. —*Ricki L. Rusting*

espinal seccionada de los roedores. Con fibroblastos manipulados se produjo una regeneración parcial de los axones. Además de una esperanzadora regeneración axonal, la NT-3 estimula la remielinización. En estos estudios, los fibroblastos pasados por manipulación genética han fomentado la mielinización de los axones regenerados y han mejorado la actividad de las extremidades posteriores.

Injerto celular

Otro planteamiento sería injertar células que normalmente existen en el sistema nervioso central. Además de servir como puentes y liberar potencialmente proteínas que ayudasen a la regeneración axonal, algunos de estos injertos podrían reemplazar a las células muertas.

El trasplante de tejido procedente del sistema nervioso central de un feto ha producido resultados estimulantes en los animales tratados poco después del traumatismo. Este tejido, inmaduro, origina nuevas neuronas con sus axones completos, que atraviesan largas distancias en los tejidos del receptor (varios segmentos hacia arriba y hacia abajo en la médula espinal o hacia la periferia). Puede, también, inducir que las neuronas del huésped envíen axones regenerados al tejido implantado. Asimismo, los receptores de los trasplantes pueden recuperar alguna función de las extremidades, su movimiento por ejemplo, algo que les queda vedado a los animales sin tratar. Y lo que es más, de acuerdo con la investigación en injertos de tejido fetal, los axones podrían encontrar su objetivo asignado en ausencia de moléculas guía que vengan de fuera. Los injertos dan mejor rendimiento en la médula espinal inmadura que en la médula lesionada del adulto, indicio de que los jóvenes son más sensibles a la terapia que los adolescentes y los adultos.

Algunos pacientes con lesiones antiguas de la médula espinal han recibido trasplantes de tejido nervioso fetal, pero se dispone de muy poca información para sacar conclusiones. En cualquier caso, la aplicación de la técnica del injerto de tejido fetal en humanos está sometida a criterios éticos, lo que, unido a la falta de donantes, limitará su disponibilidad. Por cuya razón se exploran nuevas vías para conseguir el mismo resultado. Entre tales alternativas citemos el injerto de células multipotenciales (madre): células inmaduras y capacitadas para dividirse indefinidamente, replicarse exactamente o generar tipos celulares diversos y más especializados.

Se conocen ya varios tipos de células multipotenciales. Uno de ellos genera las células sanguíneas, la piel, la médula espinal y el cerebro. Se ha observado que células multipotenciales alojadas en el sistema nervioso central de los adultos engendran neuronas y su glía acompañante, mientras que las células multipotenciales neurales parecen permanecer quiescentes en la mayoría de las regiones del sistema. En 1998 ciertos laboratorios obtuvieron, de tejidos humanos, unas células multipotenciales más versátiles. Estas células multipotenciales embrionarias (de modo semejante a las células multipotenciales extraídas antes de otros vertebrados) pueden crecer en cultivos y, en teoría, pueden generar cualquier tipo de célula corporal, incluidas las de la médula espinal.

Estrategias a seguir con las células madre

¿En qué pueden ayudar las células multipotenciales dentro de los procesos de reparación de una médula dañada? El día en que los biólogos aprendan a obtener de forma rutinaria estas células de un paciente y a controlar la diferenciación celular, se habrá dado un grandísimo paso. Los médicos podrían extraer células multipotenciales neurales del cerebro o de la médula espinal de un paciente, multiplicar *in vitro* el número de células indiferenciadas y restituir la población incrementada en la médula espinal de la misma persona, sin temor al rechazo inmunitario. O podría comenzarse con células multipotenciales embrionarias congeladas, inducirles su conversión en precursoras o progenitoras de células espinales e implantar una amplia población de células precursoras. Se está debatiendo una línea de investigación donde se examinen los efectos del trasplante de células multipotenciales neurales sobre pacientes con lesiones medulares; esas células procederían, por biopsia, del cerebro de los propios sujetos.

El mero injerto de células progenitoras en la médula podría bastar para estimular su multiplicación y diferenciación en los linajes necesarios, con la sustitución consiguiente de neuronas y células gliales perdidas y el oportuno establecimiento de las conexiones sinápticas entre neuronas. Las células multipotenciales trasplanta-

das en los sistemas nerviosos, normal y con lesión traumática, de animales de experimentación pueden formar neuronas y glía en la región donde han sido injertadas. Combinados con los resultados del tejido fetal, estos otros significan que, en el sistema nervioso dañado, preexisten muchas claves importantes para la diferenciación e indicación de objetivos. Y si hubiera que agregar una ayuda extra, para eso está la ingeniería genética. Por norma, la manipulación genética requiere de las células que sean capaces de dividirse. Las células multipotenciales cumplen este requisito, no así las neuronas maduras.

Hemos de plegarnos a la realidad y reconocer que los escenarios ideados para las células multipotenciales son futuristas. Pero también podría llegar el día en que estas células resulten innecesarias, dado el avance dado por la terapia génica. La introducción de genes en las células supervivientes de la médula espinal podría conferirles el poder de sintetizar y liberar un flujo de proteínas incesante, que estimularan la proliferación de células multipotenciales, instaran la diferenciación y la supervivencia celular y promovieran la regeneración de los axones, su orientación y su mielinización. De momento, sin embargo, seguimos en una fase de refinamiento de las técnicas para la inserción de genes en el sistema nervioso central, para el afianzamiento de su supervivencia de esos genes y para su operación idónea.

Mientras llega el instante en que sean práctica corriente en las lesiones medulares los injertos de células y la terapia génica, e incluso después, los pacientes podrían aliviar su estado con la administración de fármacos que restablecieran la señal de conducción en los axones silenciados por la desmielinización. Se está comprobando la capacidad de la 4-aminopiridina para compensar la desmielinización. Este agente bloquea temporalmente los canales de potasio en las membranas de los axones y, al hacerlo, permite a los axones transmitir señales eléctricas más allá de las zonas desmielinizadas. Algunos pacientes tratados con este fármaco han mostrado una modesta mejoría en las funciones motoras y sensitivas.

A primera vista, esta terapia podría considerarse una buena vía para tratar la esclerosis múltiple, enfermedad que destruye la mielina que ciñe a los axones del sistema nervioso central. Es una pena que los afectados de esta enfermedad son propicios a crisis epilépticas, tendencia que puede acrecentarse con la 4-aminopiridina.

El NT-3, que estimula la remielinización de los axones en animales, podría, con otros factores neurotróficos, entrar en una opción terapéutica. El NT-3 ha llegado a la fase III del ensayo clínico en pacientes con lesiones medulares, si bien el fin no es ahora restablecer la mielinización. Puede administrarse por inyección en cantidades requeridas para actuar sobre los nervios intestinales y potenciar la función del intestino, aunque las dosis son insuficientes para generar concentraciones elevadas en el sistema nervioso central. Si el ensayo corrobora la seguridad del fármaco, el éxito abriría el camino para pruebas con dosis necesarias para estimular la mielinización o regeneración.

Perspectivas para los próximos años

A lo largo del decenio hemos asistido a importantes avances en la comprensión de las lesiones de la médula espinal y en el control del desarrollo neuronal. Del mismo modo que los axones que progresan lentamente hacia sus objetivos, los investigadores se adentran poco a poco en la obscuridad y perfilan un plan de ataque racional para tratar estas lesiones. Se cuenta con la aplicación de terapias múltiples en una secuencia ordenada. Unos tratamientos combatirían las lesiones secundarias, otros estimularían la regeneración axonal o la remielinización y otros, en fin, sustituirían a las células perdidas.

¿Cuándo se encarnarán las nuevas ideas en un tratamiento real? Ojalá tuviéramos la respuesta. Los fármacos que funcionan en los animales no siempre se han demostrado útiles en clínica; los que se manifiestan prometedores en ensayos clínicos restringidos, no persisten al ampliar la muestra. Pese a todo, resulta estimulante que contemos ya al menos con dos ensayos clínicos en marcha y se prevea el inicio de otros en los próximos años.

Será más fácil limitar un foco lesional que recuperarlo. Sabido eso, los tratamientos encaminados a paliar el daño secundario al traumatismo agudo se utilizarán antes en clínica. Entre las estrategias de reparación, la de consecución más fácil será la promoción de la remielinización; sólo exige recubrir de mielina los axones intactos. Las estrategias de remielinización tienen capacidad para lograr una significativa recuperación de la función; verbigracia, el control sobre la vejiga o el intestino, atributo que las personas sanas dan por supuesto, pero que supone todo un mundo para los que sufren lesiones de la médula espinal.

La cirugía de transferencia de tendones y los dispositivos eléctricos avanzados pueden restablecer en ciertos pacientes funciones importantes. Mas, para buen número de éstos, la devolución de su autonomía en la actividad cotidiana dependerá de la reconstrucción del tejido lesionado a través de la regeneración de los axones y de la reconexión de las vías interrumpidas.

Hasta ahora, las intervenciones en animales con lesiones serias de la médula espinal han conseguido en muy pocos casos la regeneración y formación de sinapsis en el grado necesario y equivalente a lo que pudiera ser la recuperación de la función prensil de la mano o la habilidad de mantenerse en pie y caminar en los adultos humanos con lesiones de larga duración. Son enormes y muy complejas las dificultades que entraña la reparación medular; ni siquiera sabemos cuándo podrán aparecer por el horizonte las primeras terapéuticas de reconstrucción. Pero sí prevemos un progreso sin desmayo hacia esa meta.

Tradicionalmente, la atención médica se ha centrado en estrategias de compensación, que buscan sacar el máximo rendimiento de cualquier función residual de la médula lesionada. Vuelve a seguirse esa pauta. Los tratamientos diseñados para la reparación de la médula lesionada y la restauración de su función —ciencia-ficción hace apenas diez años— se ven ahora plausibles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DEGENERATION AND REGENERATION OF AXONS IN THE LESIONED SPINAL CORD. M.E. Schwab y D. Bartholdi en *Physiological Reviews*, vol. 76, n.º 2, páginas 319-370; abril 1996.

THE MOLECULAR BIOLOGY OF AXON GUIDANCE. M. Tessier-Lavigne y C. S. Goodman en *Science*, vol. 274, págs. 1123-1133; noviembre 1996.

REGENERACIÓN DE LAS CÉLULAS NERVIOSAS EN ADULTOS. Gerd Kempermann y Fred H. Gage en *Investigación y Ciencia*, págs. 14-19, julio 1999.

Causa abierta a las pruebas nucleares virtuales

El brillante plan del Departamento de Energía de los EE.UU. para sustituir las pruebas nucleares por refinadas simulaciones informáticas en tres dimensiones esconde numerosos puntos débiles

Christopher E. Paine

En agosto de 1945 cerca de 210.000 japoneses perecieron al explotar las bombas atómicas arrojadas sobre las ciudades de Hiroshima y Nagasaki. La energía nuclear había entrado en el engranaje de la máquina de guerra. En los decenios siguientes, la capacidad mortífera de una sola explosión atómica se ha elevado en casi dos órdenes de magnitud debido a la concentración de la humanidad en ingentes urbes y al enorme aumento de la potencia de las armas termonucleares. Una o dos bombas nucleares sobre Bombay o Tokio podrían aniquilar instantáneamente unos 15 millones de seres humanos.

Al terminar la guerra fría, muchas naciones se reunieron para negociar un tratado que diera carpetazo definitivo a las pruebas nucleares en cualquier rincón del mundo. El tratado de prohibición total de ensayos nucleares condiciona los procedimientos que se han venido siguiendo para evaluar los nuevos diseños de las bombas y confirmar el correcto funcionamiento de las armas almacenadas en silos militares. Por sí sola la prohibición de pruebas no puede impedir la proliferación de armas nucleares, pero sí supone un notable obstáculo para el desarrollo de ingenios basados en las reacciones de fusión, como son los diseños de cabezas nucleares de misiles más ligeras, potentes y compactas que presuntamente ha obtenido China de los Estados Unidos por medio de espionaje y acumulación de informes.

Aunque el tratado de prohibición de ensayos promete restringir la competición nuclear entre las grandes potencias y la propagación a nuevos países de armas nucleares más destructivas, lo cierto es que los Estados Unidos, Rusia, China, India y otras naciones con capacidad nuclear no lo han ratificado todavía. Países democráticos industrializados de mentalidad similar, como Canadá, Alemania, Australia, Japón, Francia y el Reino Unido, ya lo han hecho, dejando a Estados Unidos encabezar por la cola la batalla contra la proliferación nuclear.

Pese a que el sistema de seguridad nacional estadounidense desea un futuro libre de explosiones de pruebas nucleares, no está dispuesto a consentirlo sin haber mejorado las armas nucleares. Y para asegurar que el arsenal nuclear pueda evaluarse y modificarse por otros medios, tanto el Gobierno como la mayoría republicana en el Congreso han prestado un firme apoyo al programa científico de gestión de reservas nucleares. Este programa combina técnicas avanzadas de supercomputación con experimentos de laboratorio a gran escala para conseguir una capacidad de simulación tridimensional detallada de las explosiones nucleares nunca antes alcanzada.

Técnicas agresivas

Una directiva del Congreso introducida en un decreto sobre gastos de defensa suscitó en 1993 la necesidad de administrar los depósitos de armas nucleares. Bajo la dirección de la Oficina de programas de defensa del Departamento de Energía (siglas en inglés, DOE), la gestión del arsenal nuclear había crecido en 1995 hasta abarcar un colosal programa extendido a 15 años, con un coste total de más de 10 billones de pesetas, lo que triplicaba el coste del Proyecto Manhattan o la misión Apolo. El Gobierno reclama medios de "prueba virtual" para certificar que los arsenales de armas nucleares existentes puedan ser transportados y almacenados con plena seguridad en tiempo de paz, sin menoscabo de su valor militar en el caso de un conflicto nuclear.

Los ensayos virtuales reemplazarían, parcialmente al menos, a las explosiones subterráneas en el cometido de certificar que las modificaciones de armas nucleares dictadas por las nuevas exigencias militares consiguen las características de explosión nuclear deseadas. Estos recursos podrían también utilizarse para desarrollar armas de nuevo cuño, dispuestas para una prueba si la seguridad nacional exigiera abandonar con urgencia el tratado de prohibición de ensayos nucleares. El programa, de alto contenido técnico, está dirigido a tranquilizar sectores influyentes que se oponen a la prohibición de las pruebas. Pero si el exigente calendario del programa no se cumple, los adversarios del tratado podrán hallar razones para exigir que se aplace su ratificación, e incluso que se abandone el mismo hasta que el método de las pruebas virtuales haya demostrado su eficacia.

Aun cuando el programa pudiera alcanzar sus objeti-

1. LAS PRUEBAS NUCLEARES, antaño subterráneas y hoy prohibidas por un tratado internacional, están pasando al dominio virtual de la simulación por supercomputadores.





2. MILES DE PROCESADORES que operan conjuntamente en el interior de uno de los supercomputadores más rápidos del mundo hacen posible la simulación tridimensional de las explosiones nucleares. En el Laboratorio Nacional Sandia, un inspector examina los cables de conexión entre dos de los ocho armarios del computador, que separan distintas partes de la máquina con el fin de poder realizar simultáneamente operaciones clasificadas y desclasificadas.

vos, seguiría estando mal orientado en muchos aspectos. Desde una perspectiva diplomática mundial, el uso de pruebas virtuales en el marco de la gestión del arsenal prescinde de que la prohibición de las pruebas puede valer como escalón intermedio para alcanzar el objetivo más general de desarme nuclear mundial enunciado en el Tratado de no proliferación nuclear de 1968, que tuvo a EE.UU. como destacado promotor. En este tratado se limitó a cinco el número de potencias nucleares reconocidas, en recompensa a su compromiso de seguir trabajando "de buena fe" para lograr el desarme nuclear. Con el programa de gestión, sin embargo, el DOE pretende potenciar las propias capacidades de diseño de armas nucleares que el tratado de prohibición de ensayos intenta restringir. Curiosamente, el programa de gestión que hoy se aplica podría en último término favorecer presiones políticas para volver a las explosiones nucleares en países que carecen del bagaje técnico necesario para las pruebas virtuales. Además, el programa fomenta el libre intercambio de los resultados de nuevas investigaciones entre los laboratorios de armamento del DOE y la comunidad científica internacional. Con ello se ayudará a las naciones que no poseen armas termonucleares o de fisión, facilitándoles su obtención.

Moratoria de las pruebas

El DOE concibió el programa de gestión para abordar los problemas de las armas nucleares en ausencia de pruebas reales, pero también encontró así un medio para insuflar nueva vida en sus estancados laboratorios de investigación. El sector de armamento nuclear y sus aliados en el Congreso habían conseguido resistir a la prohibición de pruebas en Estados Unidos durante todo el período de la guerra fría. En septiembre de 1992, sin embargo, el Congreso acabó imponiendo una moratoria temporal a las explosiones nucleares, y fijó en el 30 de septiembre de 1996 la fecha tope tanto para un cese definitivo de las pruebas en EE.UU. como para la negociación de un tratado internacional de prohibición de los ensayos. El presidente Clinton prolongó dos veces esta moratoria unilateral de EE.UU., y en agosto de 1995 tomó la decisión de buscar un tratado de "producción nula": prohibición de todas las pruebas, por pequeña que sea la energía nuclear liberada. Por aquella época los centros de investigación de armamento nuclear estadounidenses —Los Alamos, Sandia y Lawrence— llevaban casi tres años sin realizar prueba nuclear alguna.

"Nuestros presupuestos han caído en picado en los seis últimos años", recordaba el director de Los Alamos Siegfried S. Hecker en septiembre de 1997. "Nuestra gente quería dejar el programa de armas nucleares, el complejo productor parecía perdido sin remedio... Pero la situación ha cambiado de raíz desde hace dos años, al imponerse la gestión científica de las reservas nucleares." De hecho, el programa recibe una dotación anual de 700.000 millones de pesetas, superior al nivel medio de apoyo prestado por el DOE (580.000 millones anuales) a las actividades de armamento nuclear durante los años de la guerra fría.

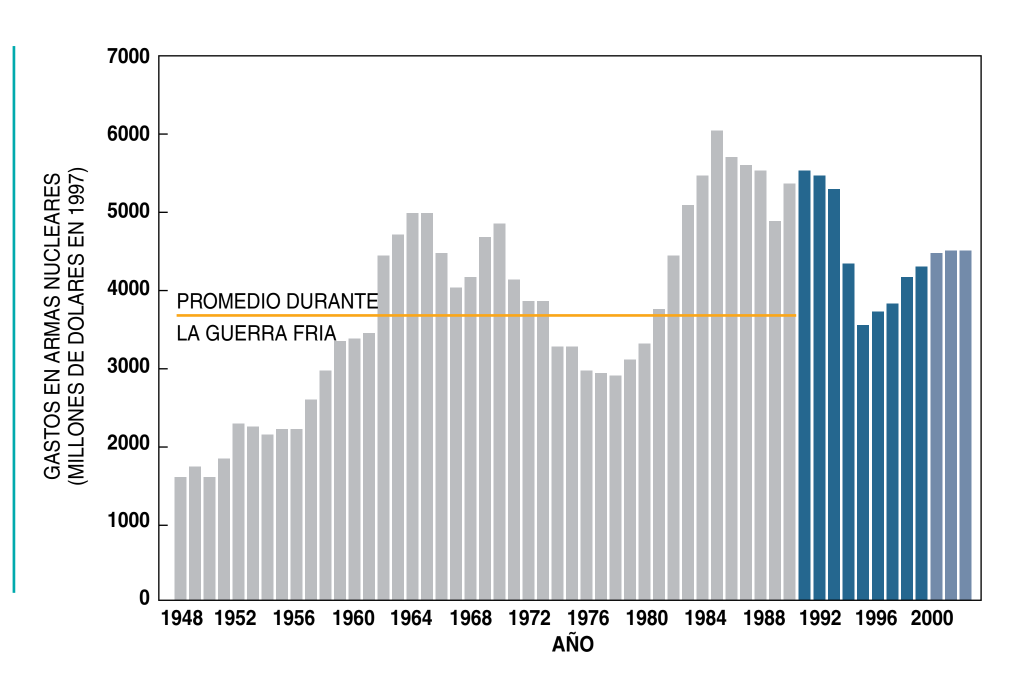
Con semejante soporte financiero, el DOE ha preparado un programa ambicioso de gestión de arsenales. El programa se vertebra sobre tres de los supercomputadores más rápidos del mundo. Dentro de estas enormes máquinas de proceso en paralelo (MPP) de la primera generación en Sandia, funcionan miles de microprocesadores como los de los ordenadores personales, pudiendo realizar dos billones de operaciones de cálculo por segundo. Merced a esta potencia de triturar números en bruto es posible simular en tres dimensiones las explosiones nucleares. El DOE se propone desarrollar computadores 100 veces más rápidos hacia el 2005.

No basta, sin embargo, con aumentar la potencia de proceso. Los modelos tridimensionales de la secuencia de la explosión nuclear requieren, para ser precisos, disponer de nuevos recursos experimentales que suministren datos de entrada detallados sobre el comportamiento de los materiales constitutivos del arma a temperaturas y presiones extremas. Los diseñadores de las armas tendrán todavía que realizar complejos experimentos a gran escala para compro-

bar las predicciones informáticas. Por ejemplo, es difícil sin explosiones subterráneas validar la fase de "hidrodinámica de radiación", es decir, la conversión de la energía en rayos X obtenida de la fisión explosiva en la etapa primaria del ingenio a las altas temperaturas y presiones que se requieren para desencadenar la fusión en su etapa secundaria.

Por esta razón, entre otras, el DOE construye en la superficie nuevos laboratorios experimentales de grandes proporciones, como el Centro Nacional de Ignición que se erige en el Lawrence de Livermore. Cuando trabaje a pleno rendimiento (algo después del 2005), unos potentes haces de láser intentarán generar un pulso de rayos X de la forma y duración necesarias para comprimir y calentar uniformemente una diminuta gota helada de deuterio y tritio, fundiendo entre sí estos isótopos pesados de hidrógeno en un proceso hasta ahora sólo presenciado en las estrellas y en las bombas nucleares.

La financiación anual de 700.000 millones de pesetas supera hoy el nivel medio de soporte a las actividades de armamento nuclear a lo largo de la guerra fría.



Provocar y capacitar

Un programa de investigación de armamentos tan ambicioso en su técnica fomenta la proliferación nuclear. En el aspecto diplomático, está henchido de una hipocresía tan evidente, que socava la ejemplaridad moral y política del comportamiento de Estados Unidos. Ciertas naciones probablemente respetarán las limitaciones que impone el tratado de prohibición mientras estén convencidas de que los EE.UU. también las respetan. Otros países con capacidad nuclear no podrán conseguir en los mismos plazos los medios de diseño y homologación de armas que contempla el programa de gestión, lo cual les hará percibir un desequilibrio estratégico que les mueva a abandonar el tratado.

Ajena a estas preocupaciones, la estrategia de gestión a largo plazo del arsenal nuclear por medio de pruebas virtuales descansa sobre una mayor colaboración entre los especialistas en armas y la comunidad científica. En opinión de los valedores del plan actual, a falta de explosiones de prueba que verifiquen el funcionamiento de las armas, los científicos tendrán que confiar mucho más en la calidad de sus dictámenes. Stephen M. Younger, director de técnicas nucleares en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, insistió recientemente en que la revisión paritaria desclasificada de investigaciones fundamentales en el terreno nuclear podría ocupar el puesto de las pruebas nucleares como "gran árbitro" de las valoraciones científicas.

El papel que el programa de gestión asigna a la comunidad de investigaciones desclasificadas trasciende la revisión paritaria y las presentaciones ocasionales en congresos. Abarca también la incorporación, dentro del programa de alianzas académicas estratégicas del DOE, de destacados científicos del ámbito universitario que consigan el gran rejuvenecimiento intelectual necesario para hacer realidad las pruebas virtuales. Apoyados en subvenciones quinquenales que totalizan miles de millones de pesetas, cinco centros de investigación universitarios y otros muchos expertos están elaborando los modelos matemáticos y algoritmos de computación necesarios para simular las distintas fases de una explosión nuclear. Los investigadores utilizan sistemas de similar complejidad en dominios desclasificados, como los de turbinas de gas, propulsores de cohetes y estrellas pulsantes, que por su analogía con los ingenios nucleares sirvan para perfeccionar y validar los modelos físicos y técnicas de computación aplicables "de puertas adentro" a la mejora de los códigos informáticos que simulan explosiones en tres dimensiones.

Younger interpreta esta diseminación de incisivas investigaciones como una forma oportuna de "disuasión científica", llamada a sustituir los vuelos de prueba de misiles, las explosiones nucleares y otras demostraciones visibles de potencia nuclear durante la guerra fría. Cuando los científicos de otros países conozcan los progresos de Estados Unidos en la investigación nuclear, se quedarán en la duda de la existencia de resultados adicionales escondidos en el dominio clasificado.

Esta actitud ofrece aspectos muy negativos. Por no estar clasificada buena parte del trabajo científico relacionado con el programa de gestión, los centros nucleares extranje-

ros podrán adquirir una comprensión mejor de los fenómenos explosivos. El que la capacidad de diseño de armas nucleares difundida por el programa de gestión de arsenales de EE.UU. se traduzca en fabricación de armas dependerá, por supuesto, de las circunstancias políticas del país o región de que se trate. Pero en un mundo inestable, plagado de conflictos a punto de estallar, la proliferación, siquiera latente, de medios para desarrollar armas nucleares no interesa a los Estados Unidos ni a la seguridad mundial.

Una alternativa falsa

En su afán de crear un innovador programa de simulación de armas nucleares que sustituya al ciclo perpetuo de proyecto y ensayo, los partidarios del plan de gestión de arsenales han puesto entre la espada y la pared a gobernantes y legisladores. El dilema según ellos consiste en adquirir el modelo de ensayos virtuales por 700.000 millones de pesetas al año aceptando los riesgos de proliferación autoprovocados, o bien perder la confianza en la fiabilidad y seguridad de las reservas nucleares hacia la mitad del próximo decenio. Este dilema, falso, se apoya en una concatenación de falacias.

En primer lugar, la custodia segura y eficaz de las cabezas nucleares no justifica por sí misma invertir un coste tan alto en un programa de preparación de pruebas virtuales basadas en supercomputadores. La seguridad del arsenal nuclear depende de empalizadas, guardias, armas de fuego, alarmas y otros elementos. La posibilidad de detonación accidental de un ingenio nuclear es un problema que suele ser inherente al diseño del propio dispositivo, y no es consecuencia del envejecimiento u otras causas. La sensibilidad de los explosivos químicos de las cabezas nucleares al impacto del fuego no aumenta con la edad; es posible probar y reemplazar los circuitos que proporcionan aislamiento eléctrico al sistema de ignición de la cabeza sin necesitar datos obtenidos de explosiones nucleares.

Se admite, sin embargo, que, por envejecimiento, una determinada cabeza nuclear tenga menos posibilidades de explotar con la fuerza que pretenden sus ingenieros. En todo caso, la historia del programa de vigilancia de arsenales en EE.UU. demuestra que los componentes nucleares explosivos utilizados en las armas operativas pueden mantenerse a través del tiempo —aunque ni modificarse ni mejorar-

Componentes de las pruebas nucleares virtuales y su crítica

El programa de gestión de arsenales nucleares del Departamento de Energía comprende tres componentes —la supercomputación, la investigación universitaria y los experimentos de fusión— cuyo objetivo es conseguir pruebas nucleares virtuales. Los responsables del programa proclaman que se necesita esta avanzada capacidad de simulación para mantener seguras y fiables las armas nucleares de EE.UU. sin recurrir a explosiones de prueba. Pero los críticos alegan que un programa técnico tan ambicioso sólo se requiere para el diseño y desarrollo de nuevas armas.



se— sin recurrir a explosiones de prueba. Y desde luego, el programa de vigilancia de arsenales del DOE demostró en 1996 que menos del uno por ciento de los 830 defectos encontrados en las armas almacenadas entre 1958 y 1993 fue descubierto en los ensayos nucleares. Después de 1970, sólo 11 pruebas entre 387 guardaban relación directa con la fiabilidad del almacenamiento de armas.

Dado que los científicos han necesitado tan pocas veces provocar explosiones nucleares subterráneas para descubrir y corregir fallos de envejecimiento en las bombas, no existe una relación obligada entre un programa de gestión destinado a sustituir las pruebas nucleares y la persistente seguridad y fiabilidad del arsenal nuclear almacenado. La verdadera utilidad de las simulaciones y experimentos de fusión por computadores de alto nivel técnico consiste en potenciar la capacidad de diseño de armas nucleares. La necesidad de tales mejoras es, empero, discutible, dado que los Estados Unidos poseen ya medios técnicos para integrar los paquetes explosivos existentes y comprobados en nuevos misiles y bombas, sin recurrir a un vasto proyecto nuevo de simulación de explosiones. Podemos perfeccionar radares, altímetros, sistemas de distribución por gas comprimido, generadores de neutrones, detonadores, baterías, circuitos integrados y otras partes del arma sin modificar el núcleo explosivo de la misma.

Los defensores del programa de pruebas virtuales apelan a la necesidad de predecir cuándo la desintegración radiactiva de los materiales de la cabeza nuclear y otros procesos degradarán la eficacia de estas armas que envejecen. Las predicciones de degradación se utilizarán para optimizar los planes futuros de nueva fabricación de cabezas nucleares, evitando el exceso de inversiones en producción de este material bélico. (Durante la época de las pruebas subterráneas, no había necesidad de repetir la fabricación de una bomba, dado que surgían nuevos diseños para sustituir a los antiguos antes de poder demostrar la vida útil de los componentes nucleares.)

CHRISTOPHER E. PAINE es investigador en el programa nuclear del Consejo de Defensa de Recursos Naturales.

Pero mantener el arsenal seguro y en condiciones de uso no exige necesariamente *predecir* el instante exacto en que los efectos antes aludidos, si no se les pone remedio, dejarían inservibles las armas. Cuando se trata del núcleo explosivo de una bomba, sólo se necesita *detectar*, mediante una minuciosa inspección, que el deterioro observado se acerca a los límites de funcionamiento aceptable que antes se hayan comprobado en explosiones de ensayo. En el caso de componentes no nucleares, mucho más numerosos, pueden detectarse y corregirse los efectos del envejecimiento por medio de controles rigurosos y recambios periódicos.

Si bien un enfoque basado en la detección, y no en la predicción, puede afectar negativamente a los plazos de las nuevas fabricaciones, el incremento de coste que esto supone dista mucho de acercarse a las enormes inversiones de capital y elevados costes fijos anuales del programa de pruebas virtuales. Cuando en el futuro descienda la magnitud del arsenal en cumplimiento de los acuerdos de control de armamentos, los posibles ahorros que proporcionaría la optimización de los planes de fabricación se reducirán igualmente.

Diferentes prioridades

En virtud de las razones técnicas y financieras expuestas, es legítimo preguntarse cuáles son exactamente los móviles que llevan al sistema de seguridad nacional estadounidense a aceptar ciegamente los riesgos de proliferación que encierra el programa de gestión. La cuestión principal que debe encarar todo plan efectivo de gestión del arsenal nuclear es cómo reducir al mínimo los problemas que aparecen al retirarse los científicos e ingenieros experimentados en la prueba de armas nucleares. Se han propuesto varias estrategias alternativas para tratar este problema, pero sólo una de ellas se ha tomado alguna vez en serio: la formación de una nueva generación de diseñadores de armas estimulados por una nueva serie de potentes medios experimentales y supercomputadores para la creación de explosiones de prueba virtuales. El resultado es un costoso programa subsidiario concebido para mantener y renovar, no las propias armas, sino quienes las crean.

Un enfoque mejor, con claras ventajas políticas y técnicas en cuanto a la proliferación, sería el reconocimiento de que no es necesario, ni se debe, reproducir en una nueva generación de diseñadores el recto criterio de unos técnicos capacitados en pruebas nucleares; probablemente ello no podría hacerse sin recurrir a pruebas nucleares explosivas. Hay que intentar por todos los medios poner límite a los cambios futuros en los diseños de armas con el fin de que sean mínimos los problemas. Para la custodia del arsenal nuclear debe adoptarse este conservador enfoque: reducir los riesgos al mínimo, evitar la proliferación y utilizar el plantel nacional actual de técnicos capacitados en pruebas para aprobar las futuras especificaciones de un limitado número de diseños de paquetes nucleares explosivos garantizados que hayan de mantenerse en el arsenal. Los componentes homologados podrán volverse a fabricar sin perder la confianza en su buen rendimiento.

Un examen más atento de los hechos conduce inevitablemente a la conclusión de que un programa de gestión más compacto, limitado en la técnica y de objetivos muy concretos, que se centrara en la capacidad de sustituir componentes de las armas, podría garantizar la seguridad y fiabilidad del arsenal nuclear de EE.UU.; favorecería también los objetivos de no proliferación nuclear del país y del mundo. En términos generales, las contradicciones inherentes al enfoque actual de la gestión de armas nucleares mediante pruebas virtuales parecen reflejar una confusión considerable y el desconocimiento del papel futuro del armamento nuclear en la seguridad de los Estados Unidos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

END RUN: THE U.S. GOVERNMENT'S PLAN FOR DESIGNING NUCLEAR WEAPONS AND SIMULATING NUCLEAR EXPLOSIONS UNDER THE COMPREHENSIVE TEST BAN. Christopher E. Paine y Matthew G. McKinzie. Programa del Consejo de Defensa de Recursos Naturales, agosto de 1997. Disponible en la dirección www.nrdc.org/nrdcpro/nuclear de la Web.

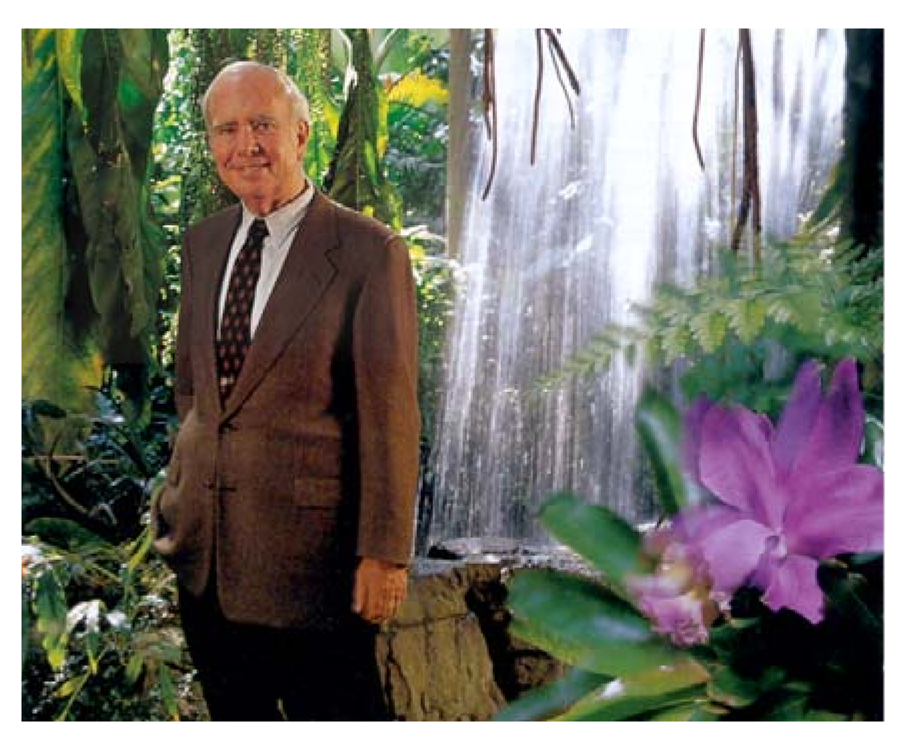
MAINTAINING A NUCLEAR DETERRENT UNDER THE TEST BAN TREATY. Sidney Drell, Raymond Jeanloz y Bob Peurifoy en *Science*, vol. 283, págs. 1119-1120; 19 de febrero, 1999.

Gary Stix

PETER H. RAVEN: Biodiversidad y coevolución

Peter H. Raven quiere que se protejan todas las especies de plantas del mundo. Absolutamente todas. Hombre acostumbrado a miras amplias, tiene un gran plan. A sus 63 años, este director del Jardín Botánico de Missouri se propuso en agosto concienciar a botánicos y fisiólogos de todo el mundo, reunidos en un congreso internacional, para que se salvara de la extinción el reino vegetal entero. Raven, que durante los dos últimos decenios ha sido un destacado defensor de la conservación de la biodiversidad, predice que —de no mediar una actuación resuelta— dos tercios de las 300.000 especies vegetales del mundo se perderán durante el próximo siglo a medida que se destruyan sus hábitats. Pero cree que un compromiso internacional para reunir las especies más vulnerables en los cultivos de los jardines botánicos, o en bancos de semillas, puede impedir la catástrofe. "Si se quisiera hacer un regalo valioso a la gente que venga dentro de 100 años, salvar todas las plantas sería uno espléndido", dice.

Un proyecto tan grandioso que puede sonar a pura fantasía. Pero Raven es miembro de 22 academias científicas y tiene un currículum impresionante en lo que se refiere a la organización de proyectos ambiciosos. (Su institución alberga las oficinas generales de una red que se propone mantener la flora estadounidense.) Acaba de cesar de director de la Academia Nacional de Ciencias, tras 12 años en el cargo, y preside la comisión asesora del Consejo Nacional de Investigación, el brazo ejecutivo de las academias de ciencias, ingeniería y medicina. Desde ese puesto ha supervisado las evaluaciones de unos 2200 proyectos, muchos de ellos sobre temas controvertidos. Raven es "un organizador científico excelente y un buen negociador", confirma Bruce M. Alberts, presidente de la academia de ciencias.



1. Activista verde. La tenacidad de Peter H. Raven ha persuadido a muchos científicos, industriales y políticos para que trabajen en la conservación de los ecosistemas

Posee también una notable habilidad para allegar fondos. En sus 30 años como director del Jardín Botánico de Missouri, ha transformado un añejo reducto académico en uno de los centros de investigación del reino vegetal más avanzados del mundo. En las dependencias del jardín, que abarca unas 35 hectáreas, trabajan 62 botánicos con grado de doctor, muchos de ellos con residencia en otros países. En colaboración con otras instituciones extranjeras, organiza campañas herborizadoras en numerosas regiones de interés botánico. Se han construido nuevos edificios.

Raven estuvo durante un tiempo en la junta que administraba las ayudas de George Soros a la antigua Unión Soviética, un puesto que le permitió obtener 1,3 millones de dólares para restaurar los decadentes locales del Instituto Komarov de San Petersburgo, que alberga las más importantes colecciones botánicas del viejo imperio comunista. También convenció a la poderosa Monsanto, con sede en St. Louis, de que donara 3 millones de dólares para un nuevo herbario y un centro de investigación a su propia institución, una conexión que al parecer no se ve menoscabada por el hecho de que su esposa, Katherine E. Fish, sea la directora de relaciones públicas de la agroquímica. Raven, muy circunspecto, no se retrae de expresar firmemente sus opiniones.

Su interés por la naturaleza empezó pronto. Tenía ocho años cuando entró en la sección de estudiantes de la Academia de Ciencias de California. A los pocos años ya herborizaba con soltura. En su liceo, a principios de los cincuenta, no se daban clases de biología. La academia le proporcionó una estructura social y la oportunidad de aprender. En 1950 le propusieron ir a un campamento con el Sierra Club a unos montes cercanos. Fue compañero de expedición de G. Leylard Stebbins, de la Universidad de California en Davis (quien, según Raven, es el más destacado botánico evolucionista de este siglo), y se convirtió en miembro habitual de las exploraciones durante los siguientes seis años.

Tras graduarse en la Universidad de California en Berkeley y en Los Angeles, entró en el claustro docente de Stanford en 1962. Pronto comenzó a destacar: se trasladó al despacho contiguo al de Paul R. Ehrlich, que estaba estudiando las dietas de las larvas de mariposa. Juntos acuñaron el término "coevolución" para describir la influencia que pueden ejercer entre sí especies mutuamente dependientes, como las mariposas y las plantas. El vocablo "hizo cristalizar toda el área de una manera especial", relata Raven.

Durante los sesenta, las ideas de Raven acerca de la población, el consumo, la técnica y el ambiente comenzaron a tomar forma a medida que fue dándose cuenta de que las tensiones que el hombre introduce en la biosfera eran "un factor completamente nuevo" en la evolución. Raven se percató de que la extinción en masa era una calamidad que estaba teniendo lugar en los trópicos mientras trabajaba, en 1967, como instructor temporal en un curso de campo en Costa Rica.

Mantuvo ese interés en el Jardín Botánico de Missouri, desde 1972 hasta hoy, ejerciendo su influencia académica para apoyar la investigación en ecosistemas tropicales. Hasta principios de los ochenta, prosiguió su actividad en la clasificación de plantas y en la evolución, especialmente en relación con la familia Onagraceae, entre las que se cuenta la prímula y el laurel de San Antonio. Pero desde entonces ha estado "casi exclusivamente" dedicado a promover la viabilidad y la conservación, sistematizando el conocimiento sobre las plantas de todo el mundo: era uno de los organizadores de la conferencia que se celebró en Washington en 1986, que introdujo el término "biodiversidad" en el léxico científico. También dedica "bastante tiempo" a la copresidencia de un proyecto conjunto con la Universidad de Pekín para la publicación de una obra de 50 volúmenes sobre la flora de China.

Raven no se arrepiente de su doble quehacer de científico y gestor: cree que la gente debería expresar su opinión "de la manera más abierta posible". Los datos brotan en su conversación: la población mundial ha crecido desde los 2500 millones en 1950, cuando comenzó aquellos campamentos en la sierra, hasta los 6000 millones actuales, señala, y el mundo, durante este período, ha perdido el 20 por ciento de la tierra arable y el 25 por ciento de la capa superior del suelo; las tasas de extinción son ahora 1000 veces mayores que los niveles históricos y siguen subiendo. La mitad de la población mundial, más o menos, está mal alimentada, mientras que en los Estados Unidos se consumen recursos a una tasa 30 o 40 veces superior a la de algunas otras partes del globo.

Raven señala la paradoja de que, si bien muchos agoreros aventuran un XXI de esplendor de la biología, las predicciones más autorizadas vaticinan que la cuarta parte de las especies de la Tierra se extinguirán en los primeros 25 años de la nuevo centuria. "Actuamos de un modo científicamente irresponsable, y hay que decirlo para que se sepa", asegura. Se planta frente a la ciega confianza en que el ingenio humano resolverá los problemas del mundo: a no ser que la población humana se estabilice y se alcancen niveles aceptables de consumo, advierte, "ni la mejor ciencia ni la técnica más avanzada podrán salvarnos". Pero confía en que las grandes empresas influyan e insten cambios constructivos.



2. La coevolución de las especies interdependientes —esta mariposa espléndidamente moteada y su flor— constituyó uno de los primeros intereses de Raven

Raven está del lado de los que piensan que la biotecnología puede contribuir a resolver los problemas del mundo mejorando las cosechas. Ha hecho campaña para que los Estados Unidos ratifiquen la Convención sobre la Biodiversidad de 1992, con la que se pretendía proteger animales y plantas en peligro, pero le preocupa lo complicado y largo que es certificar la seguridad de los organismos modificados genéticamente. Las desviaciones, asevera, en su mayor parte "nada tienen que ver con la biodiversidad". Dice que comprende que mucha gente tenga miedo de ciertos productos de la biotecnología, tales como las llamadas semillas "terminator", que sólo podrían sembrarse una vez para proteger la propiedad intelectual de quien las desarrolló. Pero quienes se oponen reflejan probablemente la preocupación subyacente sobre el control de la agricultura en el próximo siglo, sugiere Raven. Del mismo modo, la reciente ansiedad del público ante los efectos de determinado pesticida, el *Bt*, sobre la mariposa monarca, refleja un malentendido. Las mariposas monarca y otros muchos insectos mueren por millones debido a los productos químicos tradicionales, observa, de modo que suponer que el *Bt* es un gran problema reciente es "absurdo"; nada sugiere que esas mariposas consuman cantidades significativas en libertad. Estas preocupaciones, al parecer de Raven, representan aprensiones más profundas sobre la naturaleza.

Raven ha tenido la oportunidad de hacer algo sobre los temores acerca de las semillas "terminator" y las semillas "TGURT"; éstas tienen propiedades especiales que se activan al entrar en contacto con productos químicos registrados. Ha alentado al Consejo Nacional de Investigación para que formule un estudio integral sobre la propiedad intelectual en relación con las cosechas. Uno de sus frecuentes oponentes en debates sobre la biotecnología, Rebecca J. Goldburg, de la Fundación para la Defensa del Medio Ambiente, sugiere que su relación familiar con Monsanto podría provocar un conflicto de intereses. Pero su viejo amigo Ehrlich contesta que confía en la integridad de Raven. "Lo que importa no es de dónde procede el dinero, afirma, sino cómo se gasta".

Aunque Raven dejará libre el año que viene su cargo en la comisión asesora del Consejo Nacional de Investigación, sigue siendo miembro del Comité Asesor de Ciencia y Tecnología adjunto a la Presidencia, donde como director ha impulsado la elaboración de un influyente informe urgiendo a la administración a impulsar los estudios de los ecosistemas y a que cree incentivos para preservarlos.

Objetivo Saturno

La misión "Cassini/Huygens"

El último de los dinosaurios. Así llaman los físicos planetarios a la misión espacial Cassini/Huygens. Los resultados que se anticipan podrían llegar a cambiar la comprensión actual del sistema de anillos y satélites de Saturno; en ella se confía para descubrir los secretos de la espesa atmósfera y de los supuestos océanos de etano en la superficie glacial de Titán, la mayor de las lunas de Saturno.

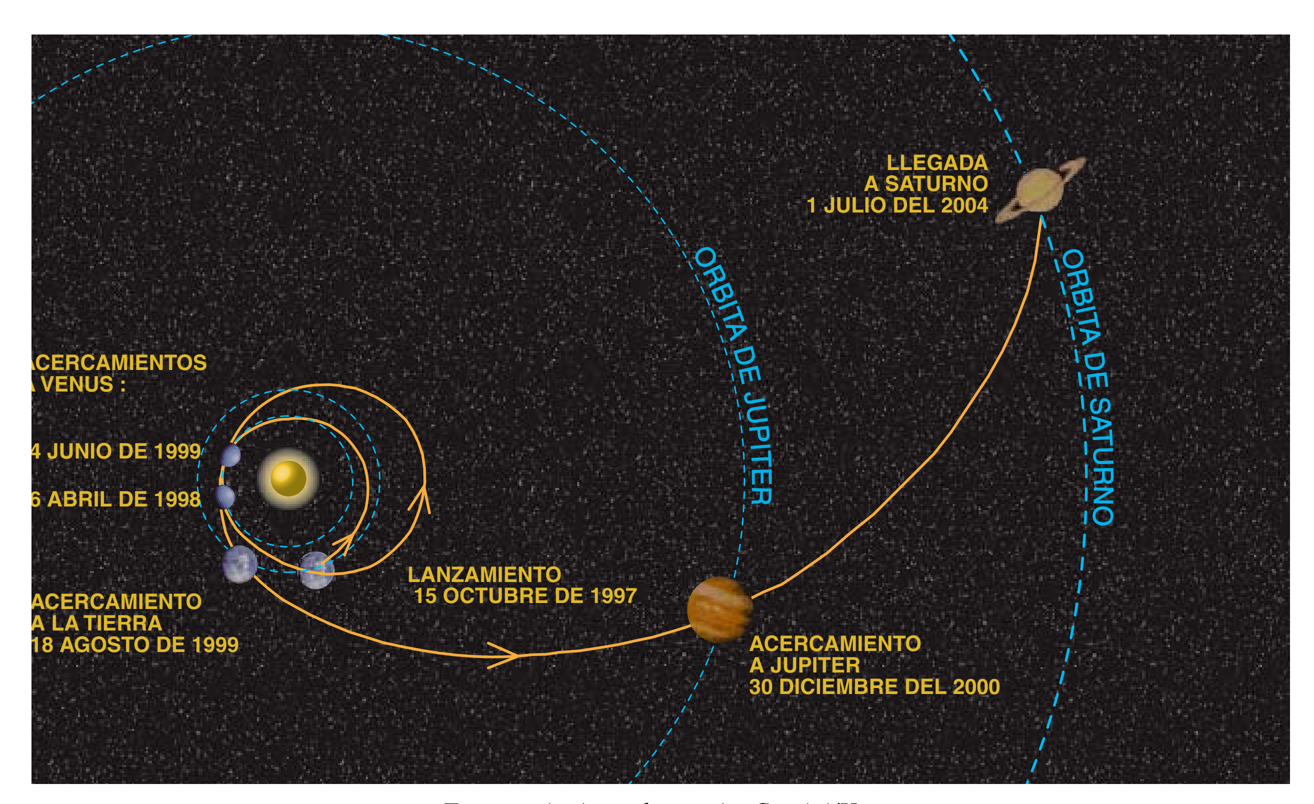
Con equipamiento norteamericano y europeo la misión fue lanzada al espacio el 15 de octubre de 1997. Se prevé que alcance Saturno en julio del 2004. Una vez en la vecindad de Saturno, y habiendo cruzado el plano de los anillos, la nave accionará sus motores durante unos 90 minutos para reducir su velocidad y poder, mediante una maniobra de inserción orbital, ser atrapada gravitacionalmente por el planeta. Poco antes de afianzarse en su órbita final, Cassini (la sonda orbital) soltará, en noviembre del 2004, a Huygens (la sonda de superficie); ésta, ayudada por un paracaídas y un escudo protector térmico, se zambullirá a 6 km/s sobre Titán 20 días más tarde.

Titán es una de las pocas lunas del sistema solar que cuenta con atmósfera, compuesta principalmente por nitrógeno molecular, al igual que la terrestre. Es además rica en compuestos orgánicos (metano, ácido cianhídrico y etano) y agua, elementos fundamentales para la presencia de vida tal como la conocemos. La nave orbital enviará a la Tierra los datos recabados de la sonda Huygens durante su caída y contacto con la superficie de Titán. Cassini permanecerá en órbita por tres años y medio estudiando en detalle el campo magnético de Saturno, la atmósfera, sus anillos y satélites.

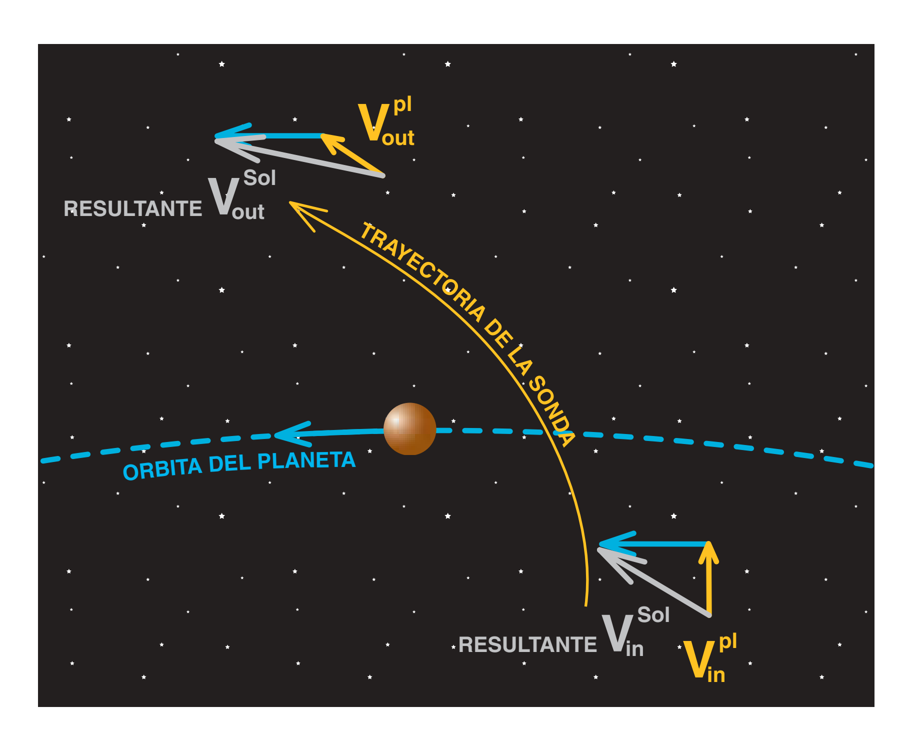
Fue Galileo quien primero apuntara su telescopio hacia Saturno en 1610, observando un objeto amarillento de forma alargada. Unos 50 años después Christiaan Huygens discernía la geometría y estructura de los anillos. Observaciones posteriores mostraron que estos anillos se ubican en el plano ecuatorial del planeta y, aunque se extienden por más de 250.000 km en diámetro, su espesor no excede los pocos kilómetros.

Durante mucho tiempo éstos fueron los únicos anillos del sistema solar. Hasta 1977 no se descubrieron los de Urano, mucho más tenues, mostrando a los astrónomos esta característica común con otros planetas gaseosos (Júpiter y Neptuno). Huygens descubrió también Titán. Al poco, Giovanni Cassini identificaba cuatro lunas más en Saturno y la principal división en sus anillos, que hoy lleva su nombre.

Al ubicarse 10 veces más lejos del Sol que la Tierra, Saturno recibe tan sólo el uno por ciento de los rayos que nosotros recibimos. La energía solar no es de mucha ayuda en las naves espaciales, ni siquiera sirviéndose de los paneles solares más modernos. Cassini precisa fuentes alternativas, generadores termoeléctricos de radioisótopos, para accionar la docena de instrumentos científicos a bordo. Estos generadores utilizan la desintegración natural



Trayectoria interplanetaria Cassini/Huygens



Asistencia gravitacional

igual velocidad con la que ingresó, $V_{out}^{pl} = V_{in}^{pl}$. Sin embargo, desde el sistema de referencia del Sol, cambia la dirección final de la nave y también su velocidad final; ésta será mayor que la previa a su paso por el planeta, $V_{out}^{Sol} > V_{in}^{Sol}$.

La nave logra así despojar al sistema solar de una parte de su inmensa reserva de momento angular, la que se traduce en un aumento significativo de velocidad para proseguir su viaje. El paso por la Tierra de la sonda Cassini/Huygens le hizo ganar una velocidad de casi 20.000 km/h. La misión se encuentra ahora en camino hacia Júpiter, a varios centenares de kilómetros de aquí, etapa número cuatro en su periplo hacia el sistema de anillos y lunas de Saturno.

ALEJANDRO GANGUI
Fondation des Treilles y
Observatorio de Meudon, París

del plutonio (básicamente Pu-238) y el calor así producido se convierte en energía eléctrica. Son livianos y compactos y ya fueron utilizados en las misiones lunares Apolo, Viking (Marte), así como también en las Voyager y Pioneer hacia los planetas exteriores.

El tamaño de la nave, similar al de un microbús, y su destino final requirieron el uso de la cohetería más potente. Luego de consumir tres pisos de un cohete Titán IV, el módulo Centauro con la nave se separó y accionando su propulsión disparó a Cassini fuera de la órbita terrestre a una velocidad de 4 km/s. Aun así la energía no sería suficiente para enviar la nave directamente a Saturno (se precisarían 10 km/s). Por ello, se diseñó una trayectoria especial. Para llegar a su destino en la forma más rápida y económica, la nave debería hacer varias "escalas" pasando dos veces por Venus, una por la Tierra, luego por Júpiter para sólo después poner proa hacia Saturno.

El 18 de agosto, a eso de las 5.30 hora local española, la nave pasó a unos 1170 km de la Tierra, en el Pacífico Sur cerca de la isla de Pascua con una velocidad de casi 60.000 km/h.

El combustible de Cassini está en forma de cerámica de dióxido de plutonio, resistente al calor, insoluble en agua, de baja actividad química y que tiende a fracturarse en pedazos grandes de difícil inhalación. Los generadores termoeléctricos de la nave no involucran procesos de fisión ni de fusión atómica como en las plantas nucleares conocidas. El dióxido de plutonio emite radiación alfa (núcleos de He-4).

¿Por qué viajar hacia el interior del sistema solar si queremos ir hacia sus confines? La respuesta la dio en los años sesenta Michael Minovitch, uno de los pioneros en la técnica de la "asistencia gravitacional". Se trata de una forma inteligente de acelerar una nave a expensas de la energía de rotación, o momento angular, de los planetas. La conservación del momento angular es la ley física que hace, por ejemplo, que no nos caigamos de la bicicleta en movimiento. Es sabido que la mayor parte del momento angular del sistema solar está depositada en el movimiento de los planetas alrededor del Sol. Así, al diseñar la trayectoria de una nave se hace que ésta llegue a las cercanías de un planeta en el momento justo, para pasarle por detrás en su órbita.

Bajo la atracción gravitatoria del planeta la nave que lo sigue por detrás se acelera y modifica su dirección tendiendo incluso a "caer" en él. Al mismo tiempo, el planeta siente la nave que lo frena, pero este efecto en su trayectoria será insignificante. La nave, sin embargo, logrará escapar del campo de atracción del planeta (ya que su velocidad inicial era mayor que la de escape) y, desde el referencial del planeta, se alejará con

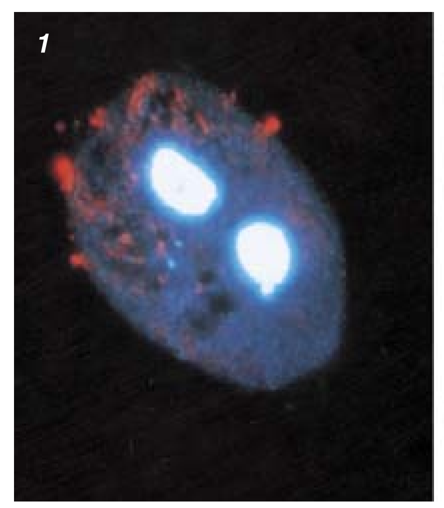
Topología biológica

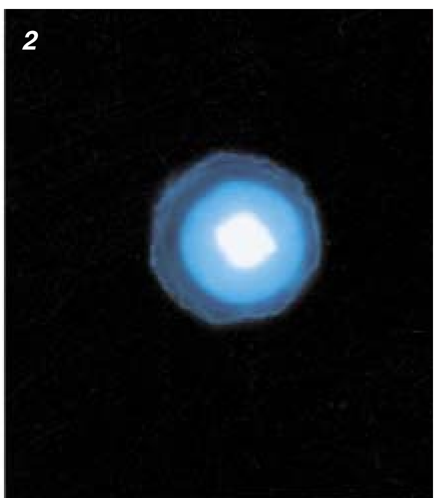
Cristales de cromatina

En el ciclo biológico de muchos microorganismos eucariotas, dotados, pues, de un núcleo conformado, lo habitual es una fase de crecimiento seguida de la división que origina nuevas células. Algunos, sin embargo, incluidos los protozoos ciliados, a ese ciclo agregan otro facultativo de diferenciación, durante el cual se forma un estado resistente. En el caso de los ciliados el ciclo de diferenciación consiste en un enquistamiento seguido de exquistamiento.

Este ciclo opcional se dispara cuando en el medio surgen condiciones que dificultan la secuencia normal del ciclo de proliferación o división. Acontece así ante la falta de nutrientes. La forma resistente (quiste) puede mantenerse en dicho estado durante largos períodos de tiempo, hasta que surjan de nuevo condiciones ambientales favorables para el crecimiento. Y cuando esto ocurre, la célula vuelve al estado vegetativo activo (exquistamiento).

Persiste cierta polémica en torno al carácter ametabólico (ausencia de un metabolismo detectable) del quiste de resistencia de protozoos ciliados. Con todo, las características ultraestructurales y moleculares de los quistes apuntan hacia esa peculiaridad.









Sistema nuclear de Oxytricha fallax*, tras tinción con el fluorocromo DAPI. La célula vegetativa muestra dos masas macronucleares (1), mientras que en el quiste de resistencia del mismo ciliado se presenta una sola masa macronuclear (2). Nos hallamos ante un ejemplo de fusión de macronúcleos durante el enquistamiento, que conlleva condensación cromatínica. En las dos imágenes siguientes, aparece la cromatina macronuclear aislada de quistes de resistencia de* Colpoda inflata*, visualizada por microscopía electrónica de transmisión tras aplicar el método de dispersión de cromatina (3 y 4). Destaca la forma hexagonal de la cromatina quística. La estructura nucleosómica se mantiene dentro de la forma hexagonal cristalina (4)*

La viabilidad del quiste de resistencia de los ciliados durante largos períodos de tiempo, privados de aporte nutricional exógeno o en sequedad, se justifica por la inexistencia de metabolismo, o, al menos, con una actividad metabólica muy exigua.

Los protozoos ciliados presentan en su citoplasma dos tipos de núcleo: el micronúcleo y el macronúcleo. El primero, diploide, sólo interviene en la conjugación. El macronúcleo, poliploide, es el encargado de la expresión génica durante la vida activa del microorganismo.

A lo largo del enquistamiento, que depende de la síntesis de ARN y proteínas, los genes macronucleares específicos del proceso se expresan biosintetizando las glucoproteínas de pared quística, entre otros componentes. Estas biosíntesis aparecen en fases tempranas del enquistamiento.

Conforme avanza el proceso de formación del quiste de resistencia, el macronúcleo y el citoplasma de las células prequísticas experimentan cambios drásticos, inducidos o acompañados en su mayoría por una elevada deshidratación celular. Por citar algunos: empaquetamiento de orgánulos (mitocondrias, ribosomas), condensación cromatínica macronuclear, reducción de volumen celular (la pérdida de volumen puede llegar hasta el 80 % en algunos ciliados), acumulación citoplasmática de macromoléculas (ARNm) e inactivación metabólica.

La condensación cromatínica macronuclear constituye uno de los cambios más interesantes, que venimos estudiando en nuestro grupo de biología molecular y celular de la criptobiosis en ciliados. Trabajamos en ciliados, y más concretamente en el modelo *Colpoda inflata*. En colaboración con M. F. Trendelenburg, de la Universidad de Heidelberg, se analizó, por microscopía electrónica de transmisión, la cromatina aislada de células vegetativas, prequísticos y quistes maduros.

Para nuestra sorpresa descubrimos estructuras hexagonales paracristalinas, constituyentes exclusivos de la cromatina macronuclear de quistes de resistencia maduros en este ciliado. Los hexágonos de cromatina están formados por fibras de organización nucleosómica, empaquetadas en forma supranucleosómica.

Por incubación con tampón borato 0,1 mM en condiciones estándar no se pueden deshacer las estructuras hexagonales. Se disgregan, y sólo parcialmente, en las fibras nucleosómicas tras largos períodos de incubación en este tampón.

Se han detectado formas intermedias de agregación cromatínica en células prequísticas. Con una organización irregular, esas formas intermedias podrían constituir los centros a partir de los cuales se originan los cuerpos regulares poligonales del quiste maduro.

Hace algo más de 10 años, Galina Sergejeva describió cristales hexagonales de cromatina macronuclear en quistes de resistencia de dos ciliados colpódidos (*Bursaria truncatella* y *B. ovata*). El hecho de que estas observaciones fueran publicadas en ruso, junto con la posibilidad de que se tratara de artefactos, sumieron el hallazgo en el olvido.

Pero el redescubrimiento de estas estructuras en otro ciliado del mismo grupo (*Colpoda inflata*), sumado a la posibilidad de incorporar precursores de ADN radiactivos, han corroborado la realidad de estas configuraciones de la cromatina macronuclear en dichos ciliados.

A altas concentraciones de ADN se pueden originar *in vitro* ordenamientos espontáneos de esta macromolécula en fases cristalinas líquidas.

Agrupaciones similares (la denominada fase columnar hexagonal) se han encontrado *in vivo* en diferentes sistemas vivos; como, por ejemplo, en bacteriófagos y en el núcleo de espermatozoides. En la formación de estos cristales de cromatina intervienen al menos dos factores importantes: la condensación y la deshidratación macromolecular, sin olvidar el efecto de proteínas básicas específicas.

Hace algunos años, señalamos la presencia de proteínas ricas en arginina (como las protaminas) en la masa macronuclear quística de la forma resistente del ciliado hipotrico *Gastrostyla steinii*. Hay fundamento, pues, para aceptar que existe biosíntesis de proteínas nucleares específicas de enquistamiento, involucradas en la compactación del ADN macronuclear.

Aunque queda mucho por saber sobre el mecanismo de formación de cristales de cromatina. Parece ya claro que se trata de otra modalidad de compactación de ADN que conlleva inactivación de expresión génica. El estudio de este modelo, que nos ofrecen algunos ciliados, puede en un próximo futuro ayudar a comprender mejor los mecanismos de compactación cromatínica.

JUAN C. GUTIÉRREZ,
A. MARTÍN-GONZÁLEZ,
y S. CALLEJAS
Departamento de Microbiología-III,
Facultad de Biología,
Universidad Complutense (UCM),
Madrid

Fenilcetonuria

Base estructural

La fenilcetonuria (PKU) es una enfermedad congénita, que la padecen uno de cada 10.000 europeos. Se caracteriza por niveles elevados y tóxicos del aminoácido esencial L-fenilalanina, por encima de uno milimolar en sangre, concentración que entorpece la síntesis de mielina y produce, en consecuencia, alteraciones irreversibles en el cerebro que llevan al retraso mental.

La causa de la fenilcetonuria reside en la deficiencia de una enzima, la fenilalanina hidroxilasa (PAH). Esta enzima hepática cataliza la hidroxilación de L-fenilalanina a L-tirosina, en presencia del cofactor tetrahydrobiopterina (BH_4) y de oxígeno molecular.

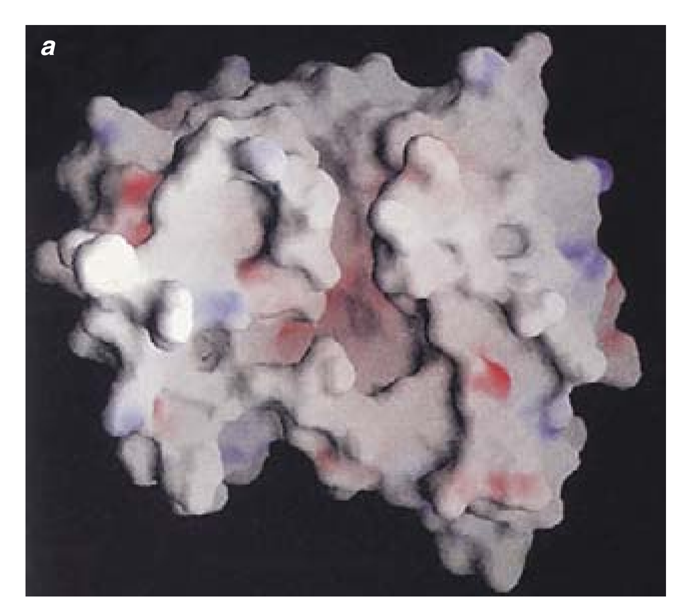
La deficiencia en el funcionamiento de la fenilalanina hidroxilasa suele deberse a mutaciones operadas en el gen. La PKU es una enfermedad autosómica recesiva. En el fenotipo metabólico y clínico de los pacientes con fenilcetonuria se advierte una elevada heterogeneidad, determinada al parecer por el genotipo de la enzima. Se han identificado varios centenares de mutaciones en el gen de la PAH humana, la mayoría de ellas causantes de fenilcetonuria o hiperfenilalaninemia (una forma menos severa de la enfermedad).

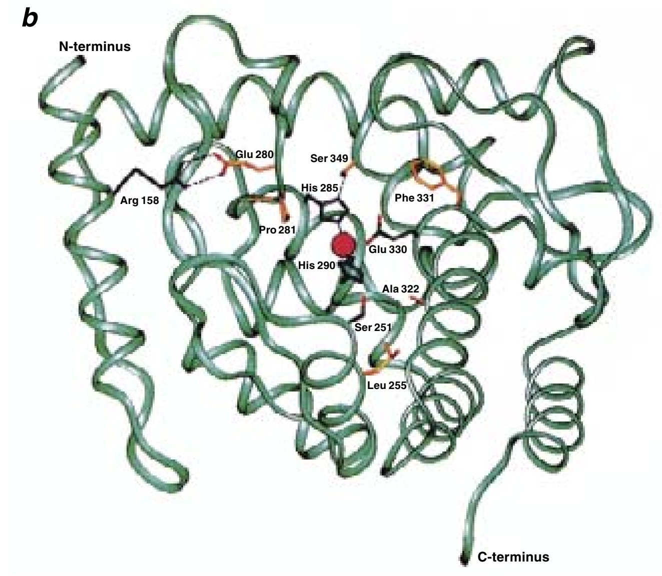
Durante los últimos años, diversos grupos de investigación han trabajado en la expresión de la forma salvaje y de mutantes de la PAH humana, para delimitar sus propiedades catalíticas y reguladoras. Pero la falta de información sobre la estructura de la PAH frenaba el conocimiento molecular del mecanismo en cuya virtud decaía la actividad enzimática en los genotipos mutantes.

Hasta que se cristalizó una forma truncada activa de la fenilalanina hidroxilasa humana. Esta molécula, dimérica en disolución, incluye el dominio catalítico (restos 103-427). Por difracción de rayos X se determinó su estructura tridimensional con una resolución de 2 angstrom. Se conoce también la configuración tetramérica de la enzima.

La estructura del dominio catalítico de la PAH tiene un contenido de α-hélices elevado (45 %). Recuerda, en sus rasgos generales, a la región correspondiente de la tirosina hidroxilasa, con cuya secuencia la fenilalanina hidroxilasa muestra un 80 % de identidad. El centro activo consta de una cavidad de 13 angstrom de profundidad y 10 angstrom de anchura; es de carácter hidrofóbico y de potencial electrostático negativo, lo que predispone para la unión de moléculas anfipáticas con un grupo cargado positivamente, como es el caso de sustratos, cofactores e inhibidores de la enzima.

La cavidad del centro activo se une a la superficie a través de un canal, por donde discurriría la fenilalanina, el cofactor tetrahydrobiopterina y el oxígeno hacia el centro activo.





Estructura del dominio catalítico de la fenilalanina hidroxilasa. (a) *Representación del contorno de este dominio orientado mirando hacia el centro activo. Posición de seis mutaciones que causan PKU/hiperfenilalaninemia (átomos de carbono en naranja) y que se encuentran bordeando el centro activo* (b)

En cada subunidad se encuentra un átomo de hierro alojado en la base del centro activo, a 10 angstrom de la superficie de la proteína. En la forma salvaje de la enzima purificada, lo mismo que en su dominio catalítico, el hierro se halla en estado férrico. Antes de proceder al primer ciclo de catálisis, la tetrahydrobiopterina reduce el hierro a su forma ferrosa. (El cofactor BH_4 participa en la reducción activante del hierro y en la reacción de hidroxilación.) El hierro está coordinado a tres restos aminoacídicos (histidina 285, histidina 290 y glutámico 330) y a tres moléculas de agua, una de las cuales, en posición axial a histidina 285, es probable que se desplace al unirse la L-fenilalanina. Se está trabajando en la determinación de la estructura de la enzima en presencia de sustrato, cofactor, análogos de cofactores e inhibidores, con el fin de resolver el mecanismo de la reacción y de identificar los restos implicados en la catálisis.

La frecuencia más alta de mutaciones en el gen de la PAH humana se da en el dominio catalítico, en el exón 7 (restos 235-280). Al investigar la región que incluye restos que rodean el centro activo (restos 245-380) se han observado numerosísimas mutaciones puntuales que causan PKU o hiperfenilalaninemia. Incluida en esta región se halla la secuencia 264-290, considerada por I. G. Jennings y colaboradores como la región donde se une BH_4, y donde se encuentran, entre otras, las mutaciones E280K y P281L.

La mutación E280K alteraría el puente salino y la red de enlaces de hidrógeno con la arginina 158, lo que podría originar un cambio en la anchura del canal. Por otro lado, prolina 281, que se encuentra a sólo 5,3 angstrom de distancia del átomo de hierro, sería esencial para definir la forma del centro activo debido

Percepción consciente

Sincronía de grupos neurales

Cuando caminamos por la calle, sentimos que nos movemos en un mundo inmediato, dotado de una coherencia y de un carácter unitario indudables, pese a su continua dinámica de cambio. Sin embargo, ese mundo exterior que sin dificultad percibimos sólo nos es dado a través de un conjunto de sensaciones heterogéneas e independientes entre sí, con la participación de varios canales sensoriales.

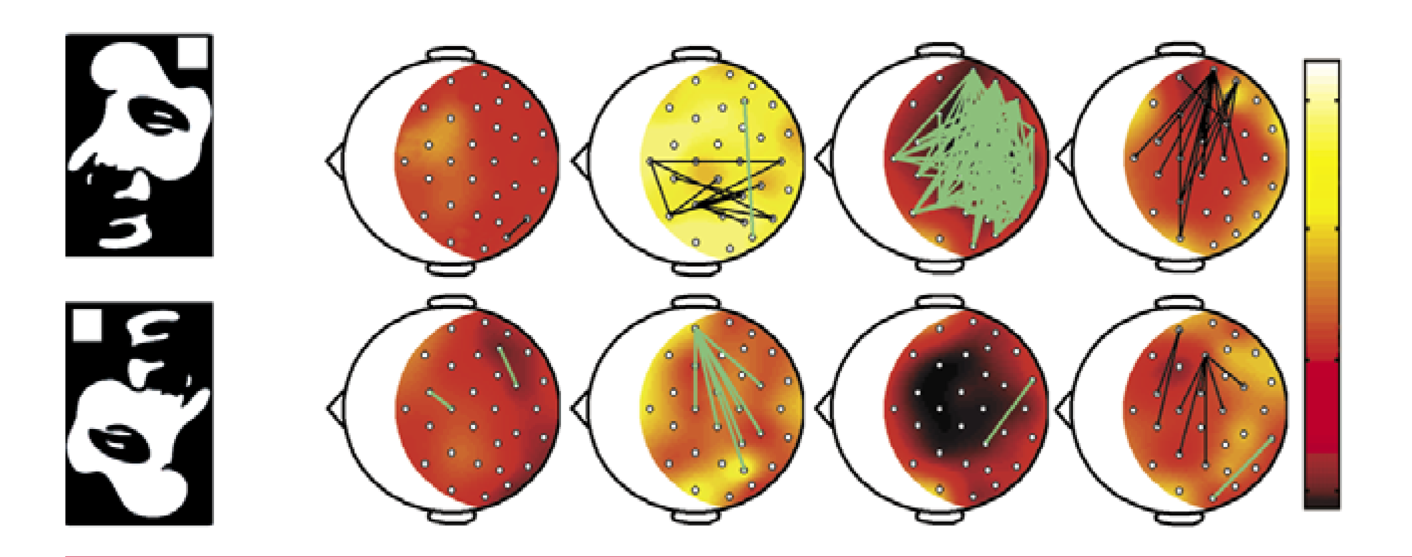
El carácter unitario de la percepción emerge de una construcción de nuestro cerebro, modulado, además, por recuerdos, conocimientos y tono afectivo del momento, entre otros determinantes internos.

Estas consideraciones, de un alcance epistemológico evidente, se proyectan en el campo de las neurociencias, donde el problema de la vinculación ("binding problem") constituye una cuestión crucial para la comprensión de la percepción y, en última instancia, de la consciencia. Problema que podemos formular del modo siguiente: "Dado que todo acto cognitivo, por simple que sea, requiere la actividad coordinada de grandes conjuntos de neuronas distribuidas por el encéfalo, ¿cuál es el mecanismo responsable del reclutamiento y coordinación de subgrupos neurales en un grupo global y coherente?"

De acuerdo con la hipótesis defendida por los autores, la constitución de un vasto conjunto neural a partir de subconjuntos neurales dispersos reposa sobre la sincronización transitoria de la actividad de las neuronas involucradas.

Varios experimentos realizados en animales avalan esta idea. Se ha demostrado que dos barras separadas en el espacio visual evocan una actividad sincrónica en neuronas distantes, cuando su movimiento es solidario (misma dirección y velocidad); se perciben entonces como un solo objeto. Pero si su movimiento no es solidario (distinta dirección y velocidad), los objetos son percibidos como diferentes; las respuestas evocadas no son sincrónicas. Esta clase de fenómenos de sincronización se observan en una banda gamma de frecuencias, que va de 30 a 80 ciclos por segundo, según el tipo de experimento y el animal que interviene.

En humanos la investigación se restringe, por lo común, a medidas no agresivas: electroencefalograma y, más re-



a las restricciones conformacionales que impone dicho aminoácido. Otras mutaciones en restos que bordean el centro activo son L255S/V, A322T/G, F331C/L, y S349P/L. Así, los aminoácidos leucina 255 y alanina 322 resultarían decisivos en el control de la separación entre las hélices α6 y α9. El resto fenilalanina 331 es consecutivo a glutámico 330, mientras que serina 349 establece un puente de hidrógeno con otro ligando del hierro, histidina 285. Por tanto, la sustitución de estos aminoácidos alteraría la geometría del centro activo. Además, algunos de estos aminoácidos parecen estar implicados en la unión del sustrato y el cofactor.

Distribuidas uniformemente alrededor de la estructura y alejadas del centro activo de la PAH, también se encuentran mutaciones que causan fenilcetonuria. De hecho, las dos mutaciones que se encuentran en casi el 50 % de los pacientes con PKU entre la población caucásica quedan lejos del centro activo: la mutación IVS12, que introduce un codón de terminación en el resto 400, y la mutación R408W, localizada en el comienzo del dominio de tetramerización. Ambas mutaciones, que afectan la correcta dimerización y tetramerización de la enzima, desestabilizan las formas recombinantes.

Gracias, en resumen, al desentrañamiento de la estructura de la PAH, marco de referencia para interpretar el efecto de las mutaciones, llegaremos a la caracterización molecular del elevado número de mutantes que producen fenilcetonuria.

AURORA MARTÍNEZ
Departamento de Bioquímica
y Biología Molecular
Universidad de Bergen,
Noruega

---

cientemente, magnetoencefalografía. Los estudios realizados sólo habían demostrado la existencia de oscilaciones en la banda gamma y su correlación con diversos procesos cognitivos, como la atención selectiva a un estimulo auditivo o la construcción de un percepto significativo a partir de un estímulo visual ambiguo. Pero no se había podido demostrar que dichas oscilaciones gamma se producían de manera sincrónica.

Nuestro equipo del hospital parisiense de la Salpétrière desarrolló un método original de cálculo de la sincronía. Gracias al cual hemos demostrado, en sujetos humanos, que la percepción de formas significativas complejas ocurre concomitantemente con la aparición de actividad sincrónica entre regiones cerebrales remotas.

En nuestro estudio la actividad eléctrica cerebral se registró por medio de numerosos electrodos repartidos en la superficie del cuero cabelludo. A los sujetos del ensayo se les ofrecía una presentación breve de figuras de Mooney; según vieran o no un rostro, debían pulsar un botón u otro. Las figuras de Mooney son fotos de alto contraste de un rostro humano, que poseen la particularidad de distinguirse fácilmente si se las contempla al derecho, pero parecen un grupo de manchas desprovistas de sentido, si se las mira al revés (*véanse las figuras a, b*).

Los principales resultados de nuestro trabajo se hallan resumidos en las figuras *c* y *d*. La escala de color representa la intensidad de la actividad oscilatoria gamma; las líneas negras y verdes conectan regiones que muestran efectos de sincronización y desincronización, respectivamente.

Se aprecia en primer lugar que la actividad oscilatoria gamma está repartida por toda la superficie del cuero cabelludo. Además, dicha actividad es similar entre las condiciones de percepción (foto presentada al derecho, el sujeto ve un rostro) y de no-percepción (foto presentada al revés, el sujeto ve manchas). La única diferencia significativa reside en torno a 230 m, tras la presentación del estímulo, en que la actividad gamma es mayor durante la condición de percepción que en la de no-percepción. A este pico de actividad, observado también en otros estudios, se le considera correlato de la percepción en sí.

Pero el patrón de sincronía que nosotros hemos descubierto muestra una estructura espacio-temporal más compleja, un patrón cuya naturaleza difiere según nos hallemos en condiciones de percepción o de no-percepción. No se aprecia apenas sincronización en la condición de no-percepción; por contra, en la condición de percepción se observa una distribución local de sincronías que evolucionan con el tiempo.

Un primer período de sincronización significativa aparece sólo en la condición de percepción, entre 200 y 260 m, coincidiendo con el primer pico de actividad gamma. ¿Qué significado encierra esto? Nos sugiere nada menos que este primer período de sincronización se hallaría implicado en el mismo proceso de percepción. A continuación, se desarrolla una fase de desincronización general, en la que se observa la conexión bilateral preferente entre regiones parietales y occipitotemporales.

En ambas condiciones experimentales, coincidente con la respuesta motora (apretar el botón de respuesta), aparece un último período de sincronización. Este es el único momento en que los patrones de sincronía de ambas condiciones (percepción y no-percepción) se parecen; y se entiende: en ambas hay respuesta.

En conclusión, nuestro experimento muestra que la aparición de una percepción significativa, un rostro aquí, se acompaña sistemáticamente de la actividad sincronizada de regiones cerebrales que son cruciales en la percepción de objetos visuales complejos. A lo que es coincidencia temporal resulta tentador conferirle rango de inferencia causal y proponer que los fenómenos de sincronía constituyen el mecanismo que permite la emergencia de la percepción integrada. Y ver en ello una etapa importante en el conocimiento de la aparición de la conciencia.

Desde esta perspectiva, la cognición y la consciencia no se hallarían ancladas en una estructura cerebral determinada ni dependerían de la actividad local, aislada, de dichas estructuras. Procesos cognitivos y conscientes resultarían de una dinámica global de las actividades cerebrales. La emergencia de la consciencia vendría dada por el establecimiento de patrones de actividad sincrónica entre regiones distantes, con independencia de las neuronas participantes.

EUGENIO RODRÍGUEZ
FRANCISCO J. VARELA
Laboratorio de Neurociencias Cognitivas
Hospital de la Salpétrière, París

Fullerenos

La familia del C_{60}

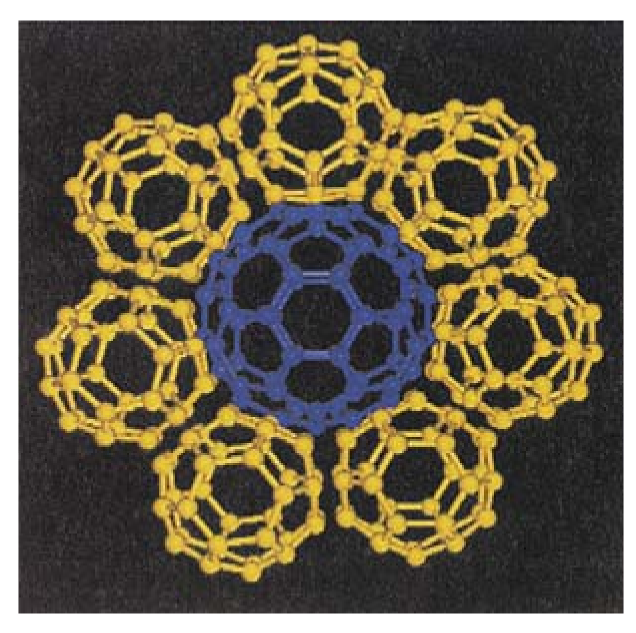
En 1990, la síntesis del C_{60}-buckminsterfullereno trajo a primer plano los nombres de Kratschmer, Lamb, Fostiropoulos y Huffman (KLFH). No sólo sorprendía la cantidad ingente de fullerenos que podían prepararse, sino también la propia simplicidad del proceso. La síntesis KLFH viene a constituir un proceso de una sola etapa: se hace saltar un arco entre dos electrodos de grafito y se generan fullerenos a granel.

La verdad es que la formación de fullerenos transcurre a través de una secuencia, rapidísima y compleja, de reacciones químicas, iniciadas con átomos y dímeros de carbono. Pese a los espectaculares avances de la química de los fullerenos desde el descubrimiento del C_{60} en el año 1985, se había ahondado muy poco en los mecanismos de formación. Pero en 1998 Piskoti, Yarger y Zettl aportaron pruebas de la producción de una importante cantidad del C_{36}. Se trataba de la primera demostración de la obtención, vía síntesis de KLFH, de fullerenos con masa molecular inferior a la del C_{60}. La mera producción de C_{36} arroja no poca luz sobre la química que conduce a los fullerenos C_{60} y mayores.

Los investigadores están de acuerdo en que el vapor generado de átomos y dímeros se condensa y crea cadenas de carbono lineales de tres a 20 átomos. El paso siguiente al crecimiento de fullerenos exige una transición de las cadenas de carbono a las estructuras anulares monocíclicas. Parece evidente, asimismo, que existan estructuras más compactas para agregados superiores a C_{30}, estructuras que serían precursoras de los fullerenos C_{60}.

Para explicar la síntesis KLFH de los fullerenos se han propuesto dos mecanismos de crecimiento. Prevén tipos estructurales harto distintos para fullerenos de masa molecular comprendida entre el C_{30} y el C_{59}. El primer mecanismo, el del camino del pentágono, postula que las estructuras tridimensionales que constan de pentágonos y hexágonos comienzan a adquirir interés a partir del C_{30}. Se atienen estos agregados a la ley crucial de que siempre es mínimo el número de pentágonos adyacentes, por cuyo motivo las estructuras tienden a permanecer abiertas en su desarrollo. El menor de los fullerenos cerrados será el primero que puede escapar a la norma de los pentágonos adyacentes; no puede ser otro más que el C_{60}.

En el segundo mecanismo propuesto, el del camino del fullereno, las estructuras tridimensionales que constan de pentágonos y hexágonos adquieren importancia hacia el C_{30}. Se admiten aquí pentágonos adyacentes; y se minimizan los enlaces sueltos.



Fullereno C_{60} rodeado por siete fullerenos C_{36}. En disolución éstos son de un color amarillo oro, mientras que el C_{60} adquiere un púrpura azulado. La simetría del C_{36} encierra parte importante de la historia química del C_{60}. En particular el C_{36} tiene el número mínimo posible de enlaces pentágono-pentágono compartidos que prevé el mecanismo de crecimiento del C_{60} conocido como el camino del fullereno

Si un agregado carece de pentágonos adyacentes (así en C_{60}), significa entonces que disfruta de una estabilización cinética. Según el mecanismo del camino del pentágono, los enlaces laxos del vértice de los agregados de carbono se convierten en centros activos para el crecimiento. Según el mecanismo del camino del fullereno, los pentágonos adyacentes, puntos de mayor energía de tensión para un fullereno cerrado, se convierten en zonas activas para el crecimiento a través de adiciones de unidades de C_2. Ambos mecanismos conducen, por supuesto, a la generación de grandes cantidades de C_{60}, C_{70} y fullerenos de mayor masa molecular. Ahora bien, los motivos cinéticos privilegian el mecanismo del camino del pentágono, en tanto que las razones termodinámicas respaldan el mecanismo del camino del fullereno.

Manolopoulos y Fowler predijeron el mecanismo del fullereno de menor energía; empezaron por el C_{24} (que sólo tiene un isómero) y terminaron con el C_{60}. En cada etapa, el isómero cerrado, caracterizado por el número mínimo de pentágonos adyacentes, se engendraba o bien por la adición directa de C_2 al fullereno vecino más pequeño, o bien mediante una reorganización Stone-Wales, que implican un mecanismo de conmutación de plazas de pentágonos y hexágonos. Aunque la mayoría de los fullerenos menores que el C_{60} presentan bastantes isómeros posibles, el mecanismo de menos energía a lo largo del camino del fullereno anticipa que habrá sólo un manojo limitado de estructuras para los fullerenos por debajo del C_{60}.

El debate no había salido, hasta ahora, de los círculos académicos. La diferencia entre estos dos mecanismos implica la existencia de una serie de agregados de átomos de carbono altamente inestables que se han hurtado a una identificación estructural. Sin embargo, gracias a la demostración de Piskoti, Yarger y Zettl, sobre la producción en masa de C_{36} mediante síntesis de KLFH, contamos con una confirmación del papel predominante de la vía del fullereno. Este mecanismo termodinámicamente domina la fabricación de fullerenos en masa.

La medición de C_{36} en estado sólido mediante resonancia magnética nuclear le asigna una probable simetría D_{6h}, que implica, entre otras cosas, la existencia de un eje de simetría hexagonal. Este resultado también es coherente con el mecanismo del camino del fullereno. La forma D_{6h} del C_{60} se caracteriza por el mínimo número posible de enlaces pentágono-hexágono compartidos; es una de las

dos estructuras de baja energía del fullereno C_{36}.

De acuerdo con las predicciones de estructura electrónica para la forma D_{6h} debiera ésta distinguirse por un estado electrónico triplete fundamental. No deja de llamar la atención que esa estructura aparezca deslabazada y no constituida en estructura energética y baja simetría D_{2d} que presenta un estado fundamental singlete. Pero las predicciones se basan en la teoría del bajo nivel de Hückel, que prescinde de las interacciones entre orbitales moleculares. Una aproximación más fina que tome en consideración estas interacciones (tales como la mezcla de enlaces sigma y pi) podría prever un estado fundamental singlete D_{6h}. Además, C_{60} reacciona prestamente en el aire para producir $C_{36}H_6$, estructura que es casi con certeza una molécula singlete.

JAMES R. HEATH
Dpto. de Química y Bioquímica
Universidad de California,
Los Angeles

Muerte súbita

Riesgo del ejercicio físico

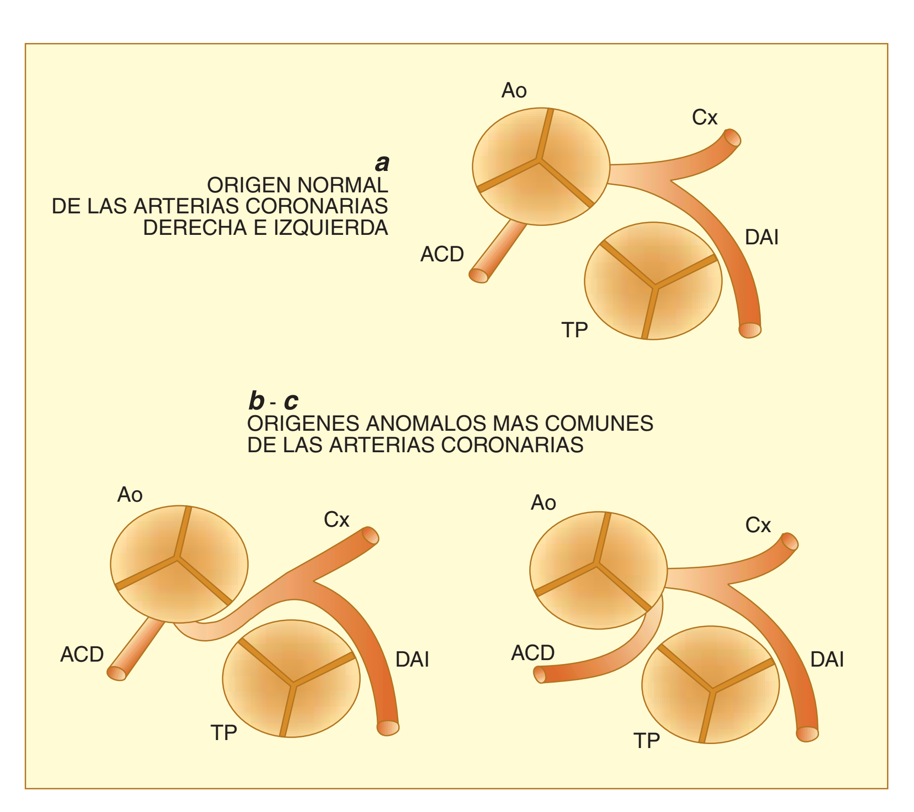
No es un fenómeno infrecuente que individuos aparentemente sanos caigan fulminados durante un ejercicio físico o al poco de haberlo realizado. Entre los deportistas, sin embargo, la incidencia de muerte súbita es muy baja. Según las estadísticas, la frecuencia anual de muerte súbita oscila entre 1 por cada 50.000 horas-jugador de rugby, 1/13.000-26.000 horas-persona de esquí de fondo y 1/396.000 horas-persona de los corredores de fondo. Suele darse sobre todo en adultos que practican deportes de amplia difusión (fútbol o esquí) y en plena ejecución de la actividad.

Se manifiesta a través de ciertos síntomas, historia familiar de muerte súbita en edades tempranas, anomalías clínicas o electrocardiográficas y factores de riesgo. Algunas estadísticas revelan antecedentes familiares en el 16 % de los casos y, síntomas, en alrededor del 50 % (dolor en el pecho y síncope o presíncope).

La mayoría de las víctimas de muerte súbita durante el ejercicio físico presentan una enfermedad cardíaca. Entre la población adulta, los mayores de 35 años o más, fallecidos durante el ejercicio, el 90 % sufren una enfermedad aterosclerótica coronaria y fibrilación ventricular terminal. Asintomáticos por lo común en vida, suelen ir asociados a hiperlipoproteinemias, obesidad, hábito tabáquico, mala preparación física y otros factores de riesgo. Según parece, existe correlación entre los ejercicios enérgicos y la muerte súbita provocada por infarto de miocardio y arritmias.

Por contra, los individuos de menos de 35 años que fallecen durante el esfuerzo físico son, a menudo, atletas asintomáticos en cuya necropsia se descubre, sin embargo, una cardiopatía de base. La inmensa mayoría de MS en jóvenes está causada por miocardiopatía hipertrófica, anomalías congénitas del árbol coronario, enfermedad de arterias coronarias, miocarditis, enfermedades cardíacas congénitas, arritmias y trastornos de la conducción.

Las anomalías coronarias entraban en alguno de los seis epígrafes siguientes: aterosclerosis coronaria, anomalías coronarias congénitas, arterias coronarias perforadas, inserción elevada del ostium coronario, traumatismo coronario y espasmo coronario. Las causas extracardíacas de muerte repentina están ligadas a roturas de aorta en el síndrome de Marfan, hemorragia subaracnoidea por



Modelos de anomalías coronarias asociadas a la muerte súbita relacionada con el ejercicio. Arriba se indica el origen normal de la arteria coronaria derecha (ACD) e izquierda. Abajo a la izquierda se ilustra el origen anómalo de la arteria coronaria izquierda principal del seno de Valsalva derecho, con paso de la coronaria izquierda entre la aorta (Ao) y el tronco pulmonar (TP). No se conoce el mecanismo exacto por el que se produce la MS, pero se ha afirmado que el ángulo agudo de bifurcación de la arteria coronaria izquierda del seno derecho produce un estrechamiento del ostium coronario. El aumento de volumen sistólico producido por la actividad física posiblemente ocasiona una dilatación de la aorta ascendente, que a su vez conduce a un ángulo más agudo estrechando el ostium coronario; esto presumiblemente ocasiona la disminución del flujo sanguíneo y, en consecuencia, isquemia del miocardio, taquicardia ventricular y fibrilación. El origen de la coronaria derecha en el seno de Valsalva izquierdo también puede causar la MS. En esta lesión existe un problema anatómico y patofisiológico en el ostium de la coronaria derecha, que es parecido al descrito anteriormente. Cx: arteria coronaria circunfleja izquierda. DAI: arteria coronaria descendente anterior izquierda

rotura de aneurismas congénitos en la base del cráneo, hemorragias digestivas, impactos torácicos y abuso de fármacos y drogas.

El impacto directo sobre la región precordial durante la práctica de algunos deportes (baseball, hockey, karate y otros) puede provocar la muerte súbita por paro cardíaco. También pueden causarla fármacos de acción proarrítmica, como las anfetaminas o las sustancias de acción vasoconstrictora coronaria (cocaína), sin olvidar los esteroides anabolizantes.

A excepción de los casos de rotura de un aneurisma vascular, la patogénesis de la muerte súbita no es de naturaleza mecánica, sino eléctrica, ligada a la aparición de fibrilación ventricular. Esta representa el accidente final de una situación de inestabilidad eléctrica del miocardio ventricular. Durante la actividad deportiva se pueden apreciar formas severas de arritmia, que aumenta el riesgo de morbi-mortalidad asociado.

Las arritmias son habitualmente intermitentes. Desaparecen durante años incluso. Si la arritmia reaparece cuando el deportista está compitiendo, se manifestará de formas dispares, desde síntomas insignificantes hasta devenir incapacitante y letal.

Aunque se reconoce la necesidad de establecer programas de selección para la identificación precoz de enfermedades cardiovasculares en atletas asintomáticos, queda fuera del alcance del sistema sanitario la realización de exámenes individualizados y periódicos de todos los atletas. Nosotros hemos desarrollado un protocolo preventivo antes de conceder un certificado de aptitud deportiva, que consta de varios pasos. En primer lugar, la anamnesis o preguntas sobre antecedentes familiares de muerte súbita, arritmias, palpitaciones, síncopes y lipotimias.

En segundo lugar, la exploración física y ECG en reposo. Las alteraciones electrocardiográficas que podemos encontrar en jóvenes con riesgo de MS son trastornos de la onda T en las derivaciones I, VL, V5, V6 que acompañan a la miocardiopatía y a las anormalidades coronarias. Puede aparecer intervalo QT prolongado, preexcitación ventricular, disfunción sinusal, taquicardia ventricular y bloqueos cardíacos.

En tercer lugar se realiza una prueba de esfuerzo máxima con registro continuo durante el esfuerzo y la recuperación. Ante la sospecha de algún trastorno o cardiopatía silente deben realizarse pruebas específicas.

A. Comella y J. R. Serra Grima
Depto. de Cardiología
y Cirugía Cardíaca.
Universidad Autónoma de
Barcelona.

Tóxicos naturales

en la alimentación

El abuso actual del calificativo *natural* como sinónimo de *saludable* olvida que las sustancias más tóxicas son naturales y pertenecen a cualquiera de los reinos clásicos vegetal, animal o mineral.

Las ficotoxinas, producidas por algas, se acumulan en moluscos y pescados. Pueden ser paralizantes, diarreicas, amnésicas, neurotóxicas y toxinas ciguatera. Los moluscos retienen las cuatro primeras, al absorber el agua en su proceso alimenticio; las toxinas ciguatera se acumulan en peces.

Las toxinas paralizantes son un grupo de toxinas producidas por di-

Tóxicos naturales en alimentos marinos

ALIMENTO	DINOFLAGELADO	TOXINAS	MECANISMOS TOXICIDAD	FISIOPATOLOGIA
Moluscos bivalvos (Mejillones, almejas, ostras)	*Gonyaulax* *Pyrodinium* *Gymnodinium*		Bloqueo canal Na^+	Neurotóxica Cardiotóxica
Moluscos bivalvos	*Gymnodinium brevis*	GBTX	Bloqueo canal Na^+	Neurotóxica
Peces tetrodotóxicos (peces espinosos, fugu)		Tetrodotoxina	Bloqueo canal Na^+	Neurotóxica
Peces ciguatóxicos (pez papagayo, pez barracuda)	*Gambierdiscus toxicus* Microalgas	Ciguatoxina Maitotoxina Scaritoxina		Síntomas GI Cardiotóxica Neurotóxica
Peces escombrotóxicos (Caballa, atún, bonito)		Histamina, saurina, metabolitos histidina		Síntomas GI Dermatotóxicos

Hongos superiores

CLASIFICACION	GENERO	TOXINAS	FISIOPATOLOGIA TOXICA
1. H. CITOTOXICOS			
1.1 T. ciclopeptídicas	Amanita, galerina, lepiota	Falotoxinas, amatoxinas	Hepatotóxicas, nefrotóxicas P. latencia (6-24 h) Alucinaciones, coma y muerte (34-63%)
1.2 T. Gén. Sulciceps	*Sulciceps*		Espasmos, disnea, anestesia, coma y muerte (80%)
1.3 Orellanina	*Cortinarius*	Orellanina	Nefrotóxica (síntomas GI, hepáticos, neurológicos, muerte 15%)
1.4 Giromitrina	*Gyromitra*	N–Me–N–formil–hidrazona (MFH)	Síntomas GI, nerviosos, renales, hepáticos. Hemolítica? Mortalidad 3%
2. H. HEMOLITICOS	*Gyromitra*, *Amanita*, *Polytrichia*, *Paxillus*	Factores hemolíticos desconocidos	Anemia hemolítica (P. incubación: 4 días)
3. H. NEUROTOXICOS	*Amanita*, *Inocybe*, *Clitocybe*	Muscarina, muscaridina, acetilcolina, ácido iboténico, muscimol, ácido tricolómico, muscatone	Hipersecreciones, temblores, narcosis, delirio, muerte por parada respiratoria
4. H. ALUCINOGENOS	*Psylocibe*, *Panaeolus*, *Amanita*, *Gymnopylus*	Psilocina, psilocibina, baeocistina, norbaeocistina, bufotenina, yangonina, bisnoryangonina	Alucinaciones, euforia, incoordinación muscular
5. H. IRRITANTES GI	*Agaricus*, *Boletus*, *Lactarius*, *Entoloma*, *Tricholoma*, *Paxillus*		Síntomas y gravedad variadas. Intoxicaciones severas en niños
6. H. TIPO DISULFIRAM	*Coprinus*, *Clitocybe*		
7. H. CARCINOGENOS	*Gyromitra*, *Agaricus*, *Polyporus*	MHF → Me–hidrazina Otras hidrazonas Nitrosaminas	Tumores ratón: hígado 33%, pulmón, v. urinaria, c. biliar

noflagelados planctónicos del género *Gonyaulax* (*Alexandrium*), cuando por aumento de la temperatura o la contaminación proliferan en exceso y originan mareas rojas. La concentración de toxinas en los órganos varía según las especies y con los cambios estacionales. Existe una correlación directa entre crecimiento de la población de dinoflagelados y toxicidad del molusco.

En atención a su estructura química, se distinguen tres grupos de toxinas paralizantes: carbamato, descarbamoil y N-sulfocarbamato. Las toxinas N-sulfocarbamato son las menos tóxicas, las descarbomoil exhiben toxicidad intermedia y las carbamato resultan las más ponzoñosas.

Las mitilotoxinas (toxinas concentradas en el mejillón) producen trastornos gastrointestinales y musculares por afectación nerviosa. Estas toxinas poseen dos grupos guanidinio. Provocan el envenenamiento mediante bloqueo de la permeabilidad al Na^+ en células nerviosas y musculares. Producen parálisis y depresión cardíaca. En el caracol de mar se ha identificado la ω-conotoxina (CTX), péptido que bloquea los canales de Ca^{++}. El receptor está localizado en la superficie de los canales de Na.

Las toxinas se absorben rápidamente en el tracto gastrointestinal; si la cantidad absorbida es elevada, los primeros síntomas aparecen a los pocos minutos. Se excretan por orina.

Los síntomas, variables, se desarrollan a los 30 minutos del consumo de la toxina. Comienza con sensación de hormigueo alrededor de labios, lengua y cara, seguido de dolor de cabeza, náuseas y vómitos. En casos más severos, se entumecen los dedos de las extremidades, brazos, piernas y cuello. El cocinado ordinario destruye aproximadamente el 70 % de la toxicidad del molusco.

Sustancias tóxicas en vegetales comestibles

TOXICOS	ALIMENTOS	FISIOPATOLOGIA TOXICA
1.Glucósidos cianogénicos (amigdalina, durrina, linamarina, etc.)	Mandioca, sorgo, s. de melocotón, albaricoque, almendras amargas	Intoxicación aguda: asfixia Intoxicación crónica: neuropatías degenerativas Bocio
2. Inhibidores colinesterasa (solanina, chaconina, tomatina)	Tubérculos (patata) Frutas (naranja) Vegetales (tomate, remolacha)	Neurotoxicidad Cardiotoxicidad Hemolisis
3. Aminas vasoactivas (dopamina, tiramina, epinefrina, serotonina, triptamina)	Frutas (plátanos y cítricos). Tomate maduro. Cebada	Crisis hipertensivas
4. Estimulantes y compuestos psicoactivos		
4.1 Cafeína, teofilina, teobromina	Café, té	Neurotoxicidad Cardiotoxicidad Mutagenicidad? Teratogenicidad? Cáncer?
4.2 Miristicina	Aceites volátiles nuez moscada, pimienta negra, perejil	Euforia, alucinaciones, narcosis, inh. MAO
4.3 Dioscorina	Batatas	Depresión SNC, delirios, convulsiones
4.4 Carotatoxina	Zanahoria, apio	Neurotóxica en roedores
* Sustancias psicoactivas en hongos superiores		
5. Latirógenos: *Lathyrus* spp. (*DBA, ODBA, ODPA, GAPN y aa inusuales)	*L. sativus* (almorta) + *Vicia sativa* (β-cianoalanina)	Osteolatirismo en animales Neurolatirismo (parálisis extremidades)
6. Favismo: vicina, convicina → divicina, isouramilo	*V. fava* (habas)	Anemia hemolítica
7. Sustancias fenólicas y alcoholes		
7.1 Gosipol	S. de algodón	Int. abs. Fe (anemia en animales, daño hepático, renal). Int. absorción lisina
7.2 Catecoles alquilados y compuestos fenólicos relacionados	Mango. Savia aceitosa de anacardo. Pistacho	Dermatotóxicas (escozor, eritemas, edemas)
7.3 Flavonas y chalconas: florizina, taninos, safrol	Manzanas	Glucosuria. Carcinogénesis
8. Fitoestrógenos		
8.1 Isoflavonas, lactonas cumarínicas, ácidos amargos	Ajo, salvia, remolacha, lúpulo, s. de soja	Gónadas (infertilidad en animales)
9. Acidos grasos		
9.1 Acido erúcico	*Brassica* spp. (s. de mostaza, colza)	Retraso crecimiento, daño hepático y renal en animales
9.2 Acidos ciclopropénicos (ac. estercúlico y málvico)	Aceite de s. de algodón	Retraso maduración en animales. Cocarcinógeno
10. Misceláneo		
10.1 Glicirrizina	Raíz de regaliz	Hipertensión, hipopotasemia
10.2 Disulfuros volátiles	*Allium* spp. (ajos, cebollas)	Irritantes mucosas
10.3 D–Manoheptulosa	Aguacate	Hiperglucemia

Con el consumo humano de mejillones y otros bivalvos nutridos de dinoflagelados tóxicos de los géneros *Dinophysis* o *Prorocentrum* aparecen trastornos intestinales con predominio de diarrea. El síndrome se denomina intoxicación diarreica por mariscos. Las toxinas diarreicas son termoestables, lipofílicas y se acumulan en el tejido graso del molusco. Se clasifican en tres grupos: ácido okadaico y sus derivados dinofisistoxinas, las pectonotoxinas y yesotoxinas.

En 1987 se registró la primera intoxicación amnésica por moluscos. Resultaron afectadas 107 personas tras consumo de mejillones que contenían ácido domoico. Este agente es un aminoácido tóxico, producido por la diatomea *Nitzschia pungens f. multiseries* y acumulado por los mejillones durante el proceso normal de filtrado. Ciertas macroalgas marinas portan también la toxina. Asimismo, se han encontrado anchovas y pelícanos que contenían ácido domoico producido por *Nitzschia pseudoseriata* (o *Pseudonitzchia australis*).

Los síntomas más frecuentes, a los tres días del consumo de los mejillones contaminados, son náuseas y vómitos, dolor abdominal, dolor de cabeza, diarreas y pérdida de memoria, con desorientación y confusión. La pérdida subsiguiente de memoria reciente predomina en mayores de 50 años. Las convulsiones observadas en algunos pacientes se correlacionan con las lesiones histopatológicas detectadas en el hipocampo y otras áreas del sistema límbico cerebral. Por lo que concierne a la pérdida de memoria, parece que la región CA3 del hipocampo es la más afectada por el ácido domoico.

La intoxicación por moluscos neurotóxicos es endémica de las costas de Florida y del océano Indico; en España aparece en el Cantábrico. Se trata de un grupo de toxinas producidas por el dinoflagelado *Ptychodiscus brevis*. Químicamente son poliéteres, liposolubles, con un componente neurotóxico que bloquea la transmisión neuromuscular y un componente hemolítico. Los síntomas más comunes, que aparecen a los 3 días del consumo de alimento contaminado, son parestesias, inversión de la sensación frío/calor, náuseas, vómitos, diarreas e incoordinación.

Las sustancias tóxicas presentes en los peces pueden concentrarse en tejidos u órganos específicos. De acuerdo con la distribución de las

toxinas, se clasifican los peces en tres grupos: ictiosarcotóxicos (con toxinas en músculos, piel, hígado, intestinos), ictiotóxicos (toxinas en gónadas y huevos) y ictiohemotóxicos (sangre). Los grupos pueden solaparse.

La ciguatera, intoxicación típica de latitudes cálidas, tiene su origen en algas (*Lyngbya majuscula*) o dinoflagelados (*Gambierdiscus toxicus*) que parasitan en peces. Ciguatoxina representa en realidad varias toxinas. Los síntomas de la intoxicación son gastrointestinales, neurológicos y cardiovasculares. La muerte sobreviene por parálisis respiratoria.

Ni los tratamientos culinarios ordinarios, ni los procesos técnicos de congelación, salazón y desecación eliminan la toxicidad del pescado contaminado.

Cada año se producen numerosas intoxicaciones por hongos venenosos. Las toxinas ciclopeptídicas, falotoxinas y amatoxinas (de potencia tóxica y mecanismo de acción diferentes) provocan el síndrome faloideo, caracterizado por dolor abdominal agudo, vómitos sanguinolentos, diarrea, que pueden revertir en 1-3 días, o continuar progresivamente hacia daño hepático y renal, alucinaciones, convulsiones, coma y muerte.

Numerosas plantas superiores ofrecen alimentos con acciones tóxicas. Aunque para que se produzcan intoxicaciones precisan un consumo elevado de alimentos, por ejemplo, que contengan glucósidos cianogénicos o inhibidores de la colinesterasa.

Una serie de plantas, usadas para infusiones, en medicina natural y, en ocasiones, como alimento del ganado y pertenecientes a las Boragináceas (*Borago officinalis, Heliotropium europaeum),* Asteráceas (senecios) y Fabáceas (crotolarias) contienen un alcaloide de estructura de pirrolizidina, que, biotransformado en el hígado, origina un compuesto electrofílico muy alquilante que lesiona el epitelio de los vasos sanguíneos. Se afecta así todo el organismo, que desarrolla un síndrome llamado *veno-oclusivo,* especialmente intenso en hígado y pulmón; la sintomatología general incluye un aumento de la resistencia circulatoria, con hipertensión, edemas, necrosis hemorrágica y muerte.

MANUEL REPETTO y ANA CAMEAN
Instituto Nacional de Toxicología.
Sevilla.
Depto. de Bioquímica,
Bromatología y Toxicología
de la Universidad de Sevilla

Reproducción femenina

Mecanismos paracrinos

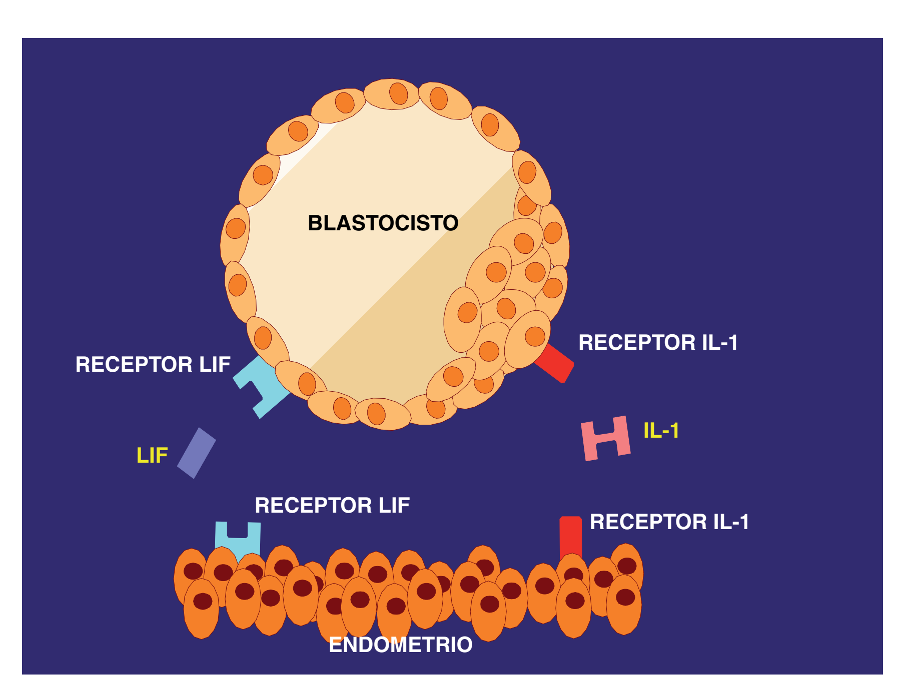
Desde hace mucho tiempo se conoce la intervención de mecanismos hormonales en la reproducción humana. Las gonadotrofinas hipofisarias y los esteroides ováricos son los representantes del control endocrino de ese proceso. Ejercen su acción en órganos situados lejos del lugar de origen de las hormonas y acceden a ellos a través del torrente circulatorio.

Se ha avanzado mucho en la identificación de factores de naturaleza peptídica que intervienen en la foliculogénesis, la ovulación y la implantación embrionaria. Moléculas de vida media muy corta, actúan de forma autocrina o paracrina, es decir, como señales locales inter o intracelulares dentro del mismo tejido. Esta regulación no hormonal está constituida por citoquinas y factores de crecimiento.

Hasta hace poco se creía que el desarrollo folicular dependía de las gonadotrofinas hipofisarias y los esteroides ováricos. Hoy sabemos que muchos factores, péptidos producidos por las células de la granulosa o de la teca desempeñan un papel decisivo en el control del crecimiento folicular, sobre todo en los mecanismos de selección y dominancia.

Pensemos en la inhibina y la activina. Amén de sus efectos hormonales de inhibición y estímulo sobre la hipófisis, respectivamente, ambos péptidos ejercen efectos autocrinos y paracrinos sobre las células de la granulosa y de la teca. Según parece, la inhibina bloquea la aromatización ovárica; la activina, amén de una inequívoca incidencia en la aromatización, ejerce un efecto mitogénico sobre las células de la granulosa, al aumentar el número de receptores para la hormona estimulante del folículo (FSH). A la activina se le atribuye un efecto inhibidor sobre la producción de andrógenos inducida por la hormona luteinizante (LH). En la granulosa de folículos preovulatorios, la activina inhibe la secreción de progesterona y evita la luteinización precoz. La folistatina, otra proteína, opera a través de la inhibición de la activina; rebaja el número de receptores para la FSH.

Péptidos importantes en la regulación paracrina del crecimiento folicular son los factores de crecimiento de tipo insulínico (IGF). La forma IGF-II se sinteiza en las células de la granulosa bajo el estímulo de la FSH. Ejerce acciones autocrinas sobre la granulosa semejantes a las de la activina, aunque su acción paracrina sobre la teca es sinérgica con la LH, por lo que aumenta la síntesis de andrógenos.



"Lenguaje" establecido entre blastocisto y endometrio durante el período de adhesión en la implantación embrionaria. Comparten los receptores donde actúan moléculas también sintetizadas por ambos

El factor de crecimiento epidérmico (EGF) y el factor transformante del crecimiento (TGF-a) presentan una estructura química similar. Ambos péptidos comparten la afinidad por el mismo receptor (EGF-R). Promueven la proliferación de las células de la granulosa e inhiben la síntesis de E2 inducida por FSH. Su producción en el folículo humano disminuye a medida que avanza el crecimiento folicular. El TGF-b, que aparece principalmente en folículos grandes, favorece la síntesis proteica en las células de la teca. El factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF) contribuye al crecimiento folicular gracias a su actividad angiogénica.

La ovulación constituye el proceso que conduce a la expulsión del ovocito maduro por el ovario y cuyo punto final está constituido por la rotura folicular. El factor desencadenante es el estímulo hormonal representado por el "pico de LH" preovulatorio. Cada vez parece más incuestionable la participación de interleucinas (sistema IL-1) en el proceso de la ovulación. En humanos, el líquido folicular preovulatorio contiene cantidades detectables de IL-1.

Los mecanismos a través de los cuales este sistema de péptidos participa en la cascada ovulatoria podrían ser la síntesis de prostaglandinas, la activación de la colagenasa o el aumento de la permeabilidad vascular. Se le asigna al sistema IL-6 la función reguladora de la ovulación y la formación del cuerpo lúteo.

La implantación es un proceso clave en la reproducción. En ella se produce una progresiva remodelación tisular. Las hormonas esteroideas inducen una serie de fenómenos moleculares a través de las acciones autocrinas y paracrinas ejercidas por citoquinas sintetizadas localmente. Mediante marcadores inmunitarios se ha demostrado que el receptor tipo I de la IL-1 se aloja en la superficie luminal del endometrio de ratón, con mayor intensidad en el período peri-implantatorio. Para demostrar en el ratón la implicación del sistema IL-1 en la implantación, se bloqueó el receptor con IL-1ra humano recombinante; a consecuencia de ello, las tasas de implantación y de gestación descendieron. En endometrio humano, se ha confirmado la presencia de la IL-1a y b, así como del receptor para la IL-1. El sistema IL-1ra se localiza en el epitelio endometrial, con mayor intensidad en la fase proliferativa.

También se ha comprobado la presencia del sistema completo IL-1 en el embrión humano. Importa destacar que sólo se sintetiza IL-1 cuando los embriones se desarrollan en co-cultivo "in vitro" con células epiteliales del endometrio o en el medio condicionado de estas células. Estos hallazgos sugieren la participación del epitelio endometrial en la regulación del sistema IL-1 embrionario. La unión de IL-1 al receptor tipo I es un paso necesario para la implantación.

Se ha demostrado que el factor inhibidor de la leucemia (LIF) es una citoquina esencial para la implantación en ratones. En humanos, el LIF se expresa en el endometrio; aumenta en la fase media y tardía lútea. No está bajo el control directo de las hormonas esteroideas, pero sí de otras citoquinas. Puesto que el blastocisto humano presenta el receptor para LIF, hemos de inferir que el embrión responde al estímulo del LIF. Todos estos mecanismos intervienen durante la "ventana de implantación", período durante el cual el endometrio se encuentra más receptivo. El LIF se halla en la decídua y en la placenta durante el primer trimestre de gestación.

La ausencia total de factor estimulante de colonias-1 (CSF-1) en cepas mutadas de ratón implica una menor tasa de implantación y de gestaciones viables. Estos efectos revertían con la administración exógena de la citoquina. En humanos se detecta un aumento en la producción de CSF-1 en el endometrio secretor, comparado con el proliferativo, alcanzando un máximo durante el primer trimestre de gestación.

José Landeras
y Antonio Pellicer
Instituto Valenciano de Infertilidad
Valencia

Funciones del floema

Transporte de señales

A través del floema discurren los azúcares y nutrientes producidos por tejidos fotosintéticamente activos. Caminan hacia tejidos consumidores. El floema está constituido por células acompañantes (CA) y tubo criboso (TC). Las células del TC, carentes de núcleo y desprovistas de ribosomas en su madurez, forman un tubo continuo con otras células.

El tubo criboso importa de las CA proteínas y otras moléculas necesarias para su funcionamiento. Se halla interconectado con las células acompañantes por medio de plasmodesmos, unos canales que ponen en comunicación a la mayoría de las células vegetales.

Se ha observado, en diversas especies, la presencia de cierto grupo de proteínas en los tubos cribosos. Algunas de éstas proteínas intervienen, según parece, en la viabilidad de los tubos cribosos de una longevidad asombrosa. Los tubos de algunas monocotiledóneas perduran hasta 50 años.

Hay proteínas de la savia de floema de calabaza que interaccionan con plasmodesmos y aumentan su diámetro eficaz; merced a ello puede darse su tránsito desde las células acompañantes hacia los tubos cribosos. Vale la pena traer a colación que las proteínas de movimiento vírico interaccionan también con plasmodesmos, lo que facilita el salto de virus de una célula a otra.

Las proteínas de movimiento vírico poseen una característica adicional, que no se ha observado hasta ahora en las proteínas vegetales. Nos referimos a la capacidad de unir ácidos nucleicos, cualquiera que sea su secuencia, y transportarlos a células vecinas. Además, los virus vegetales se desplazan por el floema durante el proceso de infección.

Todo indica, pues, que los virus utilizan el propio sistema de comunicación de las plantas, gracias al cual se desarrolla el movimiento intercelular de macromoléculas. Hipótesis que se ha visto confirmada con la observación de variantes víricas que, incapaces de producir cubierta proteica, trasiegan por el interior de los tubos cribosos, a la manera, probablemente, de un complejo nucleoproteico.

Se ha avanzado la hipótesis de que los virus habrían secuestrado componentes del sistema de comunicación para moverse por el interior de las plantas que infectan. ¿De qué componentes se trata? No parece tarea sencilla rastrear en el genoma vegetal el gen que cifra las proteínas de movimiento víricas.

La mayoría de los virus vegetales presentan un genoma de ARN. De ello cabe esperar tasas elevadas de mutación y variabilidad, así como escasa homología entre los genes víricos que codifican proteínas de movimiento y los genes vegetales que cumplen esa función.

Para abordar el problema se admitió, de partida, que las identidades en secuencia de aminoácidos entre

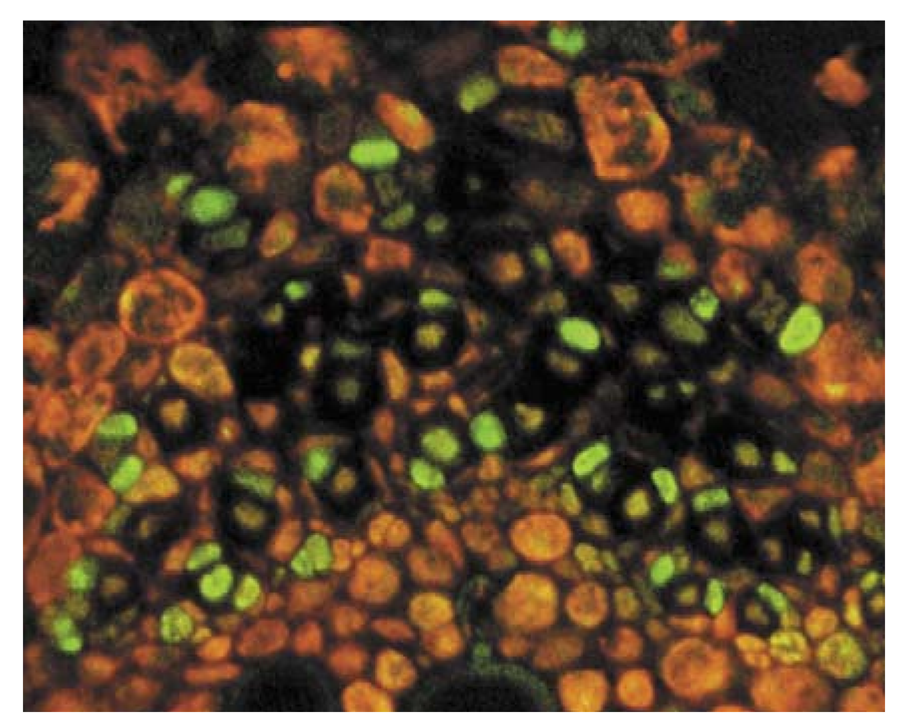


Imagen confocal del tejido vascular de tallo de calabaza. En este corte transversal se muestra la localización del ARN mensajero de CmPP16 (fluorescencia verde). *Esta señal se encuentra asociada a tubos cribosos y células acompañantes*

proteínas de movimiento víricas e hipotéticas proteínas vegetales endógenas debía ser baja; se admitió también que, ello no obstante, ambos tipos de proteínas tenían que mostrar una semejanza estructural suficiente para ser reconocidos por los mismos anticuerpos.

Los ensayos de inmunodetección, en los que se empleó anticuerpos contra la proteína del movimiento del virus del mosaico necrótico del trébol rojo, reconocieron específicamente dos proteínas de la savia de calabaza. Una de éstas, a la que hemos denominado CmPP16, fue caracterizada y resultó ser capaz de pasar de una célula a otra a través de plasmodesmos, recorriendo una larga distancia en el floema.

CmPP16 presenta una notable actividad de unión a ARN, cualquiera que sea su secuencia. Más aún, el propio ARN mensajero de esta proteína se muestra capacitado también para llegar hasta órganos lejanos vía floema. Presumimos que la proteína CmPP16 traslada, a través del floema, diversas especies de ARN mensajero a otros tejidos. La proteína posee las características precisas para constituir una genuina proteína de movimiento. Un componente adicional de este sistema de comunicación a través del floema podría ser el ARN mismo.

Existen claros indicios de "señales" que cursan a través del floema. Recientemente se ha encontrado en los tubos cribosos el ARN mensajero determinante de una proteína involucrada en el transporte de sacarosa. Cabría suponer, entonces, que ciertas moléculas de ARN pudieran funcionar como señales.

La hipótesis de moléculas señalizadoras que circulen por el sistema vascular de las plantas, coordinando procesos metabólicos, de desarrollo y otros, se ha venido esgrimiendo desde hace tiempo. Con particular insistencia, desde que se conoce la presencia de fitohormonas en la savia de floema. Ha quedado asimismo establecido el transporte de una señal producida en hojas al ápice de la planta, donde induce la floración. Con ello podría guardar relación otro fenómeno: el silenciamiento postranscripcional, en el cual la expresión de un gen o genes disminuye a niveles no detectables tras la introducción del mismo gen en la planta. La señal que induce silenciamiento a un injerto es capaz de desplazarse a través del floema. La naturaleza de tal señal se desconoce, pero es posible que se tratara de una proteína o ARN, o un complejo de ambos.

De los resultados obtenidos en ensayos provisionales parece desprenderse la existencia de diferentes especies de ARN en la savia. Se ignora qué función desempeñarían. Tal vez estas moléculas de ARN, proteínas o ambas se sinteticen en un órgano determinado, en respuesta ante la infección por un patógeno, el período de radiación diurna o cualquier otro estímulo, para pasar luego a un tejido "blanco" (por ejemplo, hojas sistémicas, que adquirirían resistencia contra infecciones ulteriores).

El próximo reto consiste en desentrañar la misión que cumplen ARN y proteínas que se desplazan a tejidos distantes, así como elucidar los componentes de la maquinaria involucrada en este proceso.

ROBERTO RUIZ MEDRANO,
WILLIAM J. LUCAS
y BEATRIZ XOCONOSTLE CÁZARES
Sección de Biología Vegetal,
Universidad de California en Davis

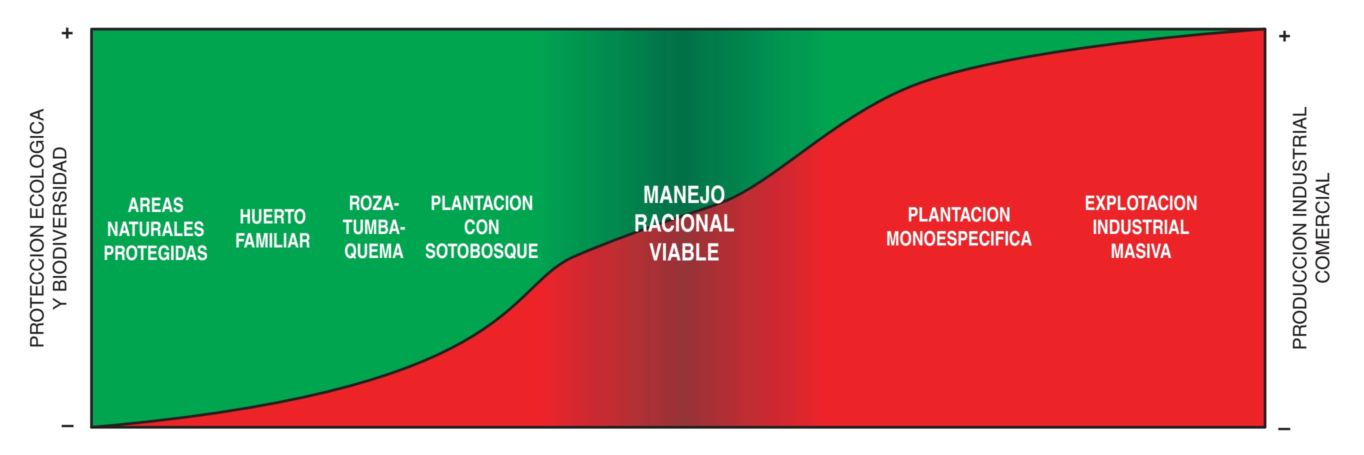
Ecosistemas forestales

Su gestión

La gestión racional de los ecosistemas forestales es uno de los problemas ambientales de mayor alcance y una tarea principal de los gobiernos y sociedad contemporánea. Así se desprende de los trabajos internacionales sobre evaluación de los bosques y se recoge en las resoluciones de las conferencias internacionales sobre biodiversidad y cambio climático.

Los bosques constituyen el mayor bioma terrestre. Se extienden desde los trópicos hasta latitudes polares, desde el nivel del mar hasta varios miles de metros. Su patrón fisionómico cambia, con la latitud y elevación, de los bosques tropicales a los bosques caducifolios y a los bosques de coníferas. En conjunto, los ecosistemas forestales abarcan casi un tercio de la superficie terrestre (~ 354.000 millones ha).

En los bosques vive el 70 % de las especies vegetales. Muchas constituyen recursos de importancia directa para el hombre (maderas, medicinas, alimentos y bancos de genes). Los bosques protegen cuencas y ciclos hidrológicos, frenan la erosión de los suelos y absorben los gases atmosféricos, estabilizando el clima local y global. Si bien la deforestación y tala de la cubierta forestal planetaria arro-



Diferentes formas de gestión de los ecosistemas forestales, situadas en un gradiente de protección ecológica-producción comercial. Las formas de la izquierda, compatibles con la conservación, se restringen a una economía de subsistencia local. Los modelos de gestión forestal ubicados a la derecha resaltan el rendimiento económico, sobre todo a corto plazo, pero con un costo considerable sobre la conservación ecológica. En una posición intermedia entre ambos extremos se ubicarían las formas de manejo racional viable

jan unas 1,4 gigatoneladas de carbono a la atmósfera, los bosques podrían capturar entre 1 y 3 gigatoneladas de carbono/año, durante un siglo.

Las estimaciones de la deforestación global son limitadas. Solamente de las selvas tropicales se calcula una altísima tasa de deforestación, de 10,5 millones ha/año, a finales de la década de los ochenta. Las selvas están seriamente amenazadas. A menos que se instrumente un plan global de gestión, sólo persistirán los bosques de áreas protegidas.

La gestión forestal comprende una gama de prácticas que se ubican a lo largo de un eje de variación cuyos extremos antagónicos son los bosques "intactos" (por ejemplo, las áreas protegidas) y los bosques bajo tala comercial intensa. En los segundos se busca la producción comercial con rendimiento a corto plazo; por definición, no interesa tanto invertir en cosechas futuras cuanto extraer el máximo volumen de madera que aumente los beneficios.

Las plantaciones comerciales y monocultivos caen cerca del extremo de la producción industrial en el eje de conservación-producción. En el polo opuesto se encuentran varias prácticas bien representadas en las zonas tropicales: los agroecosistemas tradicionales y huertos familiares, la roza-tumba-quema y la gestión que se apoya en plantaciones de árboles nativos con un sotobosque rico. En los dos primeros casos, aunque con gran potencial para la conservación biológica, su capacidad productiva se restringe a la subsistencia local. En los dos últimos casos, los productos pueden cosecharse por varios años, permitiendo el consumo local, cierto nivel de comercialización y mantenimiento de una diversidad biológica mayor que las plantaciones de monocultivos. Pero la viabilidad económica y ecológica de estas formas de gestión, a largo plazo, es cuestionable.

Han de armonizarse la gestión conservacionista y la economicista. Para ello debe operarse en un ámbito espacial amplio, a la escala de paisaje. Y apoyarse en la dinámica y modelización de la regeneración del ecosistema. Se trataría, por ejemplo, de alternar fracciones de bosque para conservación-regeneración (sobre todo de zonas vulnerables o muy valiosas como los corredores riparios) con áreas de extracción locales. Se ha comprobado que el corte en bandas espaciadas y cosecha secuencial aplicado en la Amazonía peruana es compatible con la dinámica ecológica de la selva.

La extracción de productos no maderables y el turismo ecológico, bajo supervisión de las comunidades locales, refuerza el uso múltiple viable. Dada la creciente aceptación de la importancia ecológica de los bosques para la humanidad, los aspectos de costo y compensación a las comunidades locales que se ven forzadas a explotarlos bajo inercias económicas derrochadoras deben formar parte de la ecuación de la gestión racional forestal.

RODOLFO DIRZO
UNAM, México

Resinas epoxy

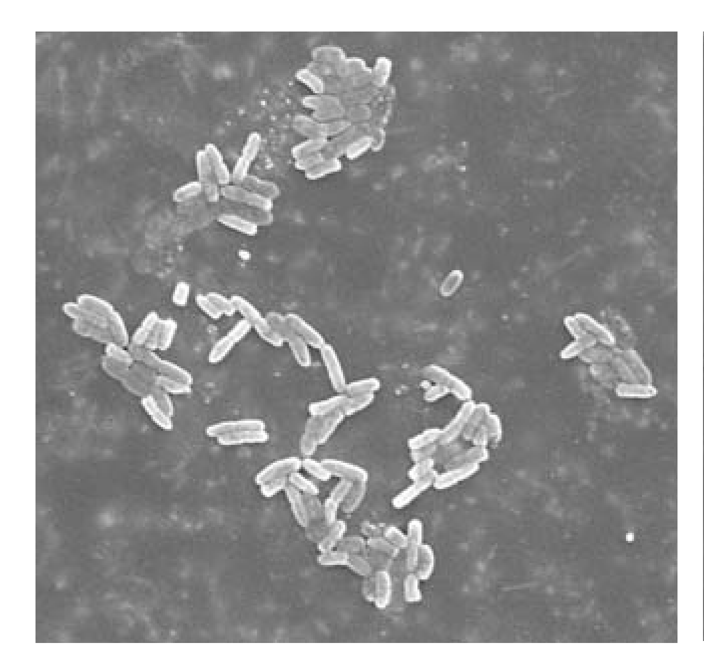
Y alimentación humana

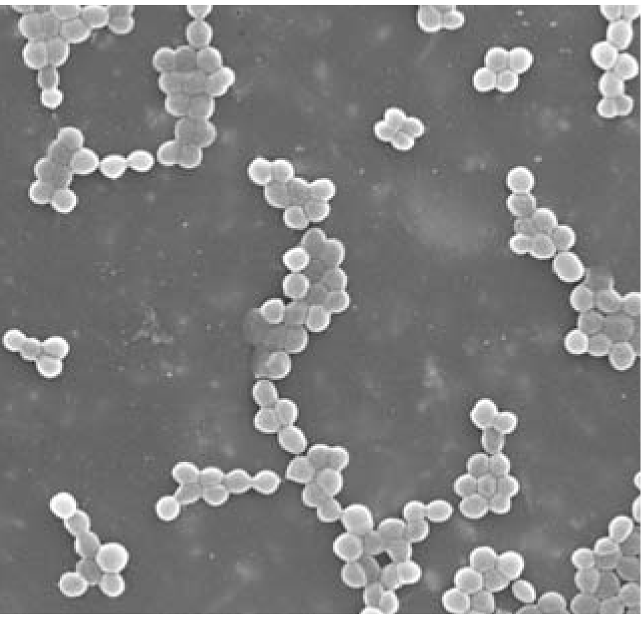
Bajo el nombre de resinas se agrupan sustancias orgánicas, unas naturales, de origen vegetal, y otras sintéticas, que presentan notable resistencia y estabilidad. Las sintéticas se producen por polimerización de compuestos entrecruzados.

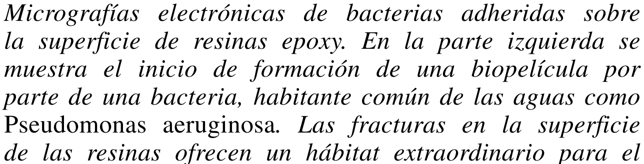
Las resinas epoxídicas deben su nombre al "grupo epóxido" que contienen, un compuesto del tipo "éter cíclico", con tres centros (dos átomos de carbono y uno de oxígeno). Las resinas epoxy, como se las conoce también, encuentran amplia aplicación en la industria alimentaria, para revestimiento de cubas, vagones, cisternas de barcos, canalizaciones y tuberías.

Aunque pueden sintetizarse y reticularse *in situ*, no se hallan exentas de riesgo. Pronto se vio, por ejemplo, que los vinos almacenados en contacto con resinas presentaban un sabor a almendras amargas, causado por el ácido cianhídrico que poseen en apreciables cantidades. El sabor cianhídrico de la cuba procedía del alcohol benzílico empleado como plastificante en el revestimiento epoxy.

La piel de manzanas almacenadas en cámaras de refrigeración revestida con resina epoxy ennegrecen. Se desata ese problema si los solventes que intervienen en la composición de la resina no han tenido tiempo suficiente de secado. En la mente de muchos estará todavía el episodio del fracasado transporte inicial







Micrografías electrónicas de bacterias adheridas sobre la superficie de resinas epoxy. En la parte izquierda se muestra el inicio de formación de una biopelícula por parte de una bacteria, habitante común de las aguas como Pseudomonas aeruginosa*. Las fracturas en la superficie de las resinas ofrecen un hábitat extraordinario para el desarrollo bacteriano, dado que en su interior las bacterias se encuentran total o parcialmente protegidas del efecto de los agentes antibacterianos y, en el caso de tuberías, del efecto de arrastre por la corriente. En la parte derecha se observan células de* Staphylococcus aureus *adheridas a la superficie de la misma resina*

de cisternas desde Barcelona hasta la isla de Mallorca. Las primeras cargas hubieron de desecharse ante el olor y sabor desagradable producido por una mala reticulación de las resinas que revestían las cubas del barco.

Las bacterias se adhieren bien a la superficie de las resinas, donde medran, proliferan y amenazan con contaminar los productos almacenados. Nuestro grupo de la Universidad de Barcelona, en colaboración con la Universidad de Montpellier, se propone determinar los riesgos y ventajas de la utilización de resinas epoxy en el revestimiento de contenedores, conducciones y tuberías, en particular del agua destinada al consumo.

Las redes de distribución de agua de Europa suelen ser bastante antiguas, en avanzado estado de deterioro. Se pierden así importantes volúmenes de agua y se intensifica el riesgo de contaminación química y biológica. El revestimiento de las tuberías con resinas epoxy evitaría ese derroche, eliminaría riesgos de contaminación y ahorraría la inversión costosísima de una sustitución total de la red.

Para decretar la idoneidad de compuestos que entren en contacto con los alimentos o el agua se establecen tests de biocompatibilidad. Con tales pruebas se valora la toxicidad, concepto amplio donde entran desde el daño inmediato hasta la respuesta retardada de la sustancia empleada.

En el momento en que un alimento entra en contacto con un material se establecen interacciones mutuas con intercambio o migración molecular. Hay migraciones deseables (envejecimiento de un vino en una barrica de roble); en otras ocasiones provocan defectos organolépticos (agua deteriorada de las cisternas transportadas a Mallorca) o plantean problemas sanitarios (tubería de plomo, que incrementa la concentración de este metal pesado en el agua de consumo).

Las pruebas de biocompatibilidad de un material atraviesan en biología un triple filtro: *in vitro*, con cultivos celulares; *in vivo*, con animales de experimentación, y, por fin, estudios clínicos con humanos. Los estudios *in vitro* acaban declarando si la sustancia es tóxica o inocua para las células. Los estudios *in vivo* con animales se proponen medir la toxicidad en el desenvolvimiento normal de un organismo. Superadas esas dos fases, se procede al ensayo en humanos.

Si la adherencia bacteriana termina en colonización, forman biopelículas sobre la superficie donde se incrustan. Esas láminas pueden ser monoespecíficas o estar formadas por especies diversas En cualquier caso, superficie y bacterias adheridas constituyen un ecosistema activo. Las bacterias adheridas resisten mejor los desinfectantes, antibióticos, etc. A su vez, producen una gran cantidad de material extracelular (glicocáliz) que deviene entorno adecuado para la fijación de nuevos microbios pobladores. Este desarrollo de las poblaciones bacterianas adheridas a superficies puede obstruir la luz de una conducción, resistiendo presiones hidrostáticas considerables.

La adherencia bacteriana depende de las propiedades del material. Pero podemos investigar la eficiencia real de la adhesión bacteriana mediante la cuantificación de los individuos adheridos por unidad de tiempo. Para determinar la adherencia a las resinas epoxy recurrimos a la microscopía electrónica de barrido.

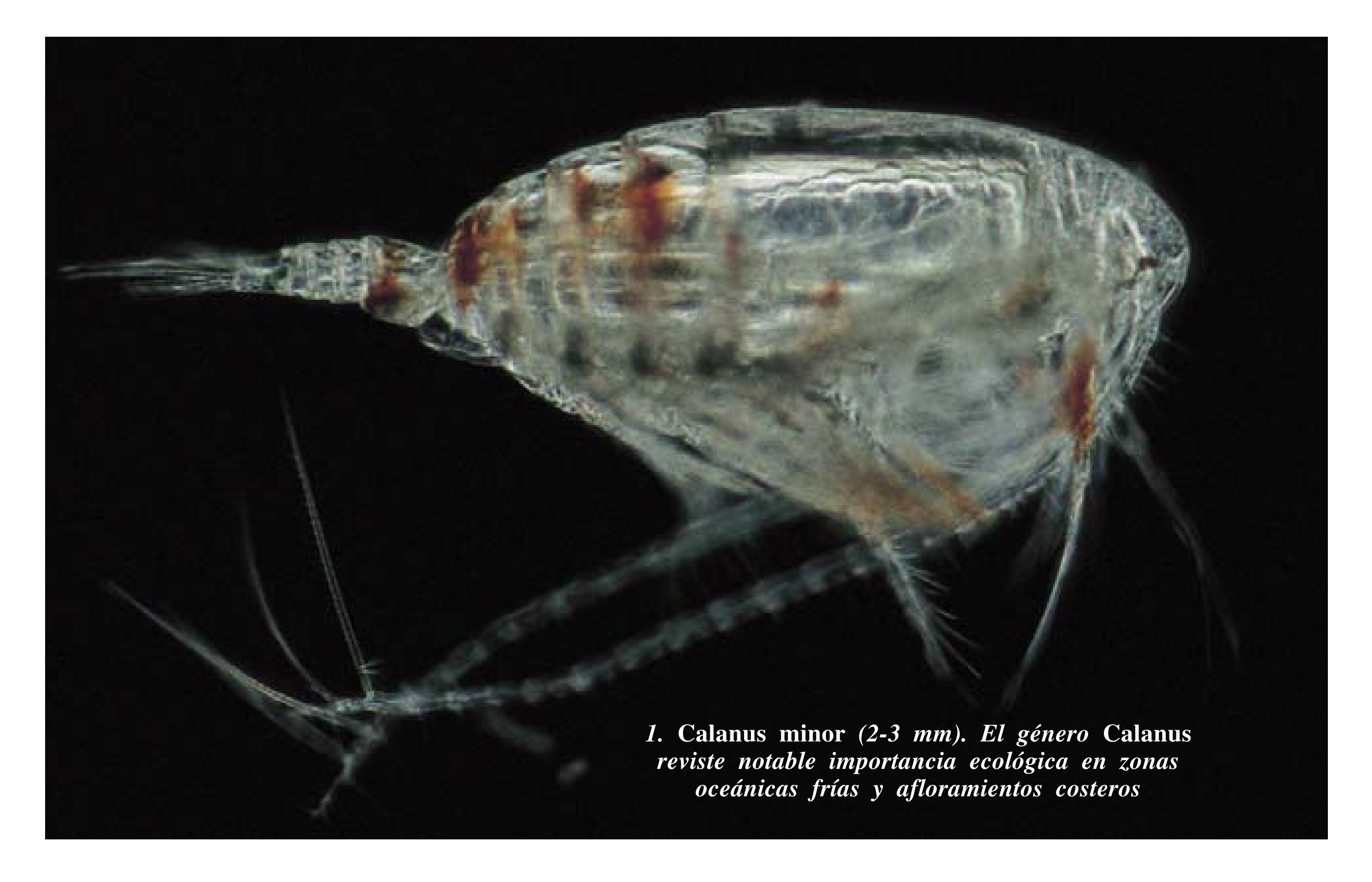
En definitiva, la utilización de resinas epoxy para el recubrimiento de contenedores alimentarios puede constituir una buena forma de ahorro y una solución técnicamente factible siempre y cuando venga precedida de prueba de garantía que supone el test de biocompatibilidad.

MIQUEL VIÑAS CIORDIA
RICARDO PÉREZ TOMÁS
Campus de Bellvitge,
Universidad de Barcelona

De cerca

Texto y fotos: Albert Calbet

Copépodos, los insectos del mar



1. **Calanus minor** *(2-3 mm). El género* **Calanus** *reviste notable importancia ecológica en zonas oceánicas frías y afloramientos costeros*

Los copépodos son, probablemente, los animales pluricelulares más abundantes del planeta. Estos crustáceos de un insignificante milímetro de tamaño superan en número a los mismos insectos, no así en diversidad específica. Son organismos acuáticos, marinos en su mayoría y de distribución cosmopolita. Han colonizado multitud de ambientes, desde las heladas aguas que rodean los casquetes polares hasta los océanos tropicales. Si bien predominan los de vida libre que se alimentan de organismos unicelulares (algas y ciliados), no son pocas las especies depredadoras de otros copépodos, cuando no parásitas de cetáceos, peces, equinodermos, moluscos y anélidos.

Desempeñan un papel decisivo en las redes tróficas planctónicas; de ahí su interés en los ecosistemas marinos. Constituyen el principal nexo de unión entre productores primarios (algas) y consumidores secundarios (larvas de peces). Por ello mismo, son pieza clave en la dinámica de las pesquerías e, indirectamente, en el control biológico del clima (calentamiento o enfriamiento de la atmósfera debida a emisiones de gases por parte de organismos vivos).

Se reproducen mediante huevos. Unas especies los liberan en el mar y otras los transportan hasta que nacen los juveniles. Una vez eclosionados los huevos, los neonatos completarán su desarrollo pasando por 12 fases larvarias, siempre y cuando consigan suficiente alimento y eviten la depredación. Un copépodo adulto puede vivir desde pocas semanas a varios años; todo depende de la especie de que estemos hablando y de la suerte y de las condiciones de vida.

2

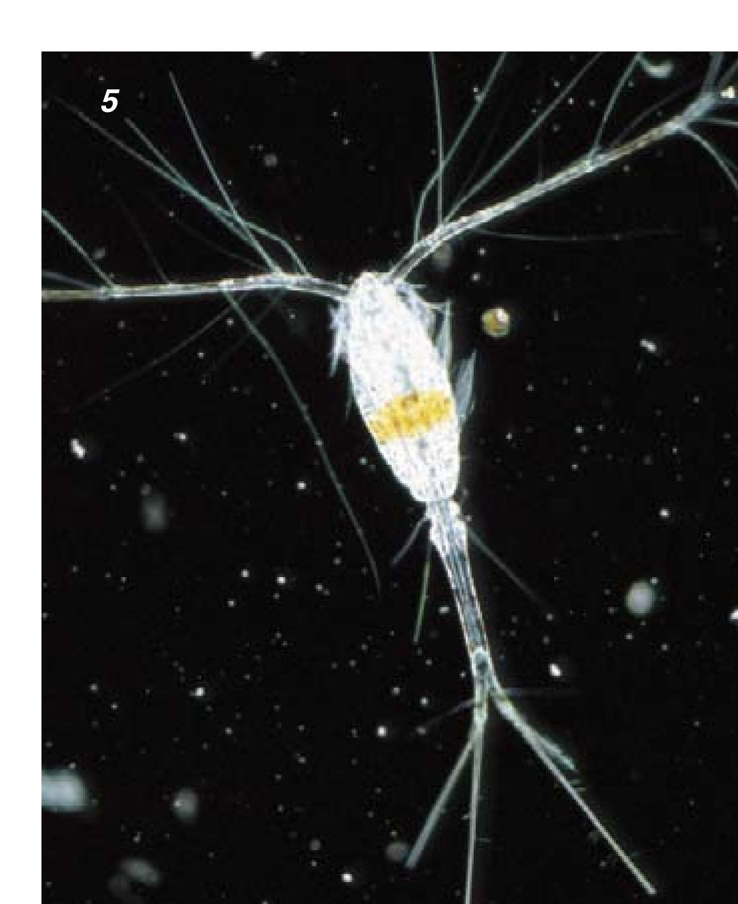


2. Saphirina *sp (1-2 mm). Este copépodo debe su especial coloración a cristales de guanina que reflejan la luz y le confiere diferentes tonalidades*

3. Arctodiaptomus salinus *(1,5 mm). Copépodo típico de salinas. Su coloración roja se debe a un pigmento fotoprotector*

4. Fase juvenil (nauplio V) de Acartia grani *(0,3 mm). Hasta completar el estadio séptimo, las fases naupliares no tienen ningún parecido con los adultos*

5. Oithona plumifera *(1 mm). Los copépodos del género* Oithona *están presentes en la mayoría de los mares. Abundan por igual en zonas costeras y oceánicas*



4


Así vivía *Tyrannosaurus rex*

Mediante el análisis de fósiles preteridos y la reconsideración de viejos hallazgos, los paleontólogos comienzan a atisbar la conducta real de los tiranosaurios

Gregory M. Erickson

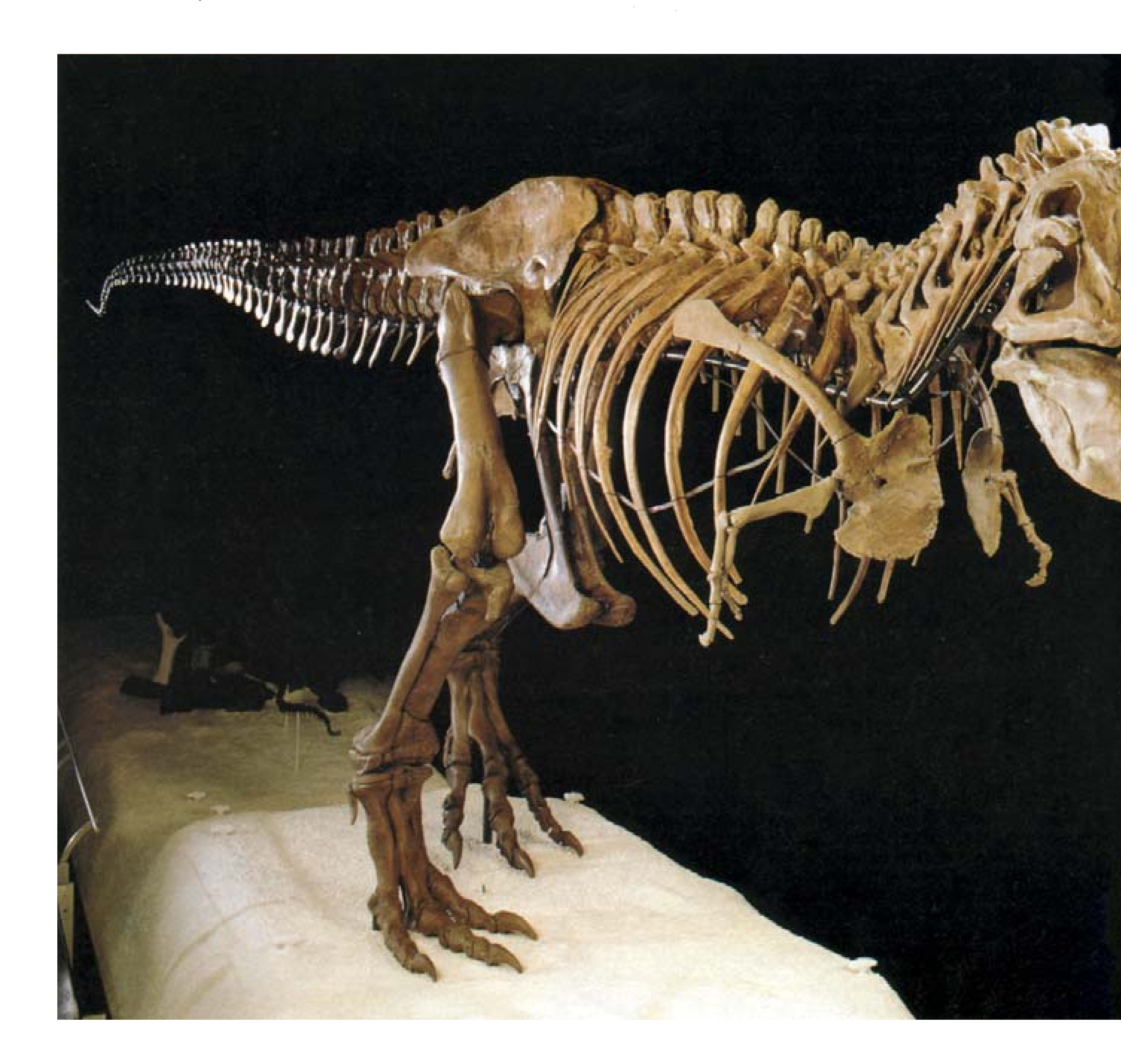


1. *TYRANNOSAURUS REX* defiende su comida, un *Triceratops*, frente a otro compañero, también hambriento. Troodóntidos, los pequeños velocirraptores que aparecen abajo a la izquierda, esperan los despojos que les dejen los tiranosaurios, mientras los pterosaurios los sobrevuelan en círculos, en una día cualquiera de hace 65 millones de años. Arboles y plantas con flores completan el paisaje; las gramíneas tenían todavía que desarrollarse.

Los dinosaurios dejaron de caminar por la Tierra hace 65 millones de años. Aunque nadie lo diría, con velocirraptores protagonizando películas y tricerátops decorando los dormitorios de adolescentes. Steven Spielberg ha logrado que haya una especie profundamente impresa en la fantasía juvenil. También los paleontólogos están de acuerdo en que la superestrella de los dinosaurios fue *Tyrannosaurus rex*.

Afirma Stephen Jay Gould, de la Universidad de Harvard, que el nombre de una especie compendia una teoría sobre el animal. *Tyrannosaurus rex* —"el rey entre los lagartos tiranos"— evoca una imagen poderosa de la especie. John R. Horner, de la Universidad de Montana, y Don Lessem anotaron lo siguiente en su libro *The Complete T. Rex*: "Tenemos la suerte inmensa de poder conocer a *T. rex*, estudiarlo, imaginarlo y dejar que nos asuste. Pero, sobre todo, tenemos la inmensa suerte de que *T. rex* haya desaparecido." Y Robert T. Bakker, del Museo Paleontológico Glenrock en Wyoming, decía de nuestra fiera que era "un correcaminos infernal de 4500 kilogramos", en alusión a su tamaño y fuerza.

En *Parque Jurásico*, que presume de ser la mejor representación que se haya hecho de los dinosaurios, *T. rex* aparece constituido en una máquina asesina sin otro fin que la agresión cruel de víctimas indefensas. Pero semejante estampa brota de una licencia artística, sin fundamento científico. Tras un siglo de estudio y la exhumación de 22 esqueletos, casi completos, poseemos ya una cantidad sustancial de información sobre su anatomía. Ahora bien, resulta peligroso inferir aspectos de conducta a partir exclusivamente de la anatomía. Por eso, la naturaleza genuina de *T. rex* sigue envuelta en el misterio. Se debate todavía si nos hallamos ante un depredador o ante un carroñero.



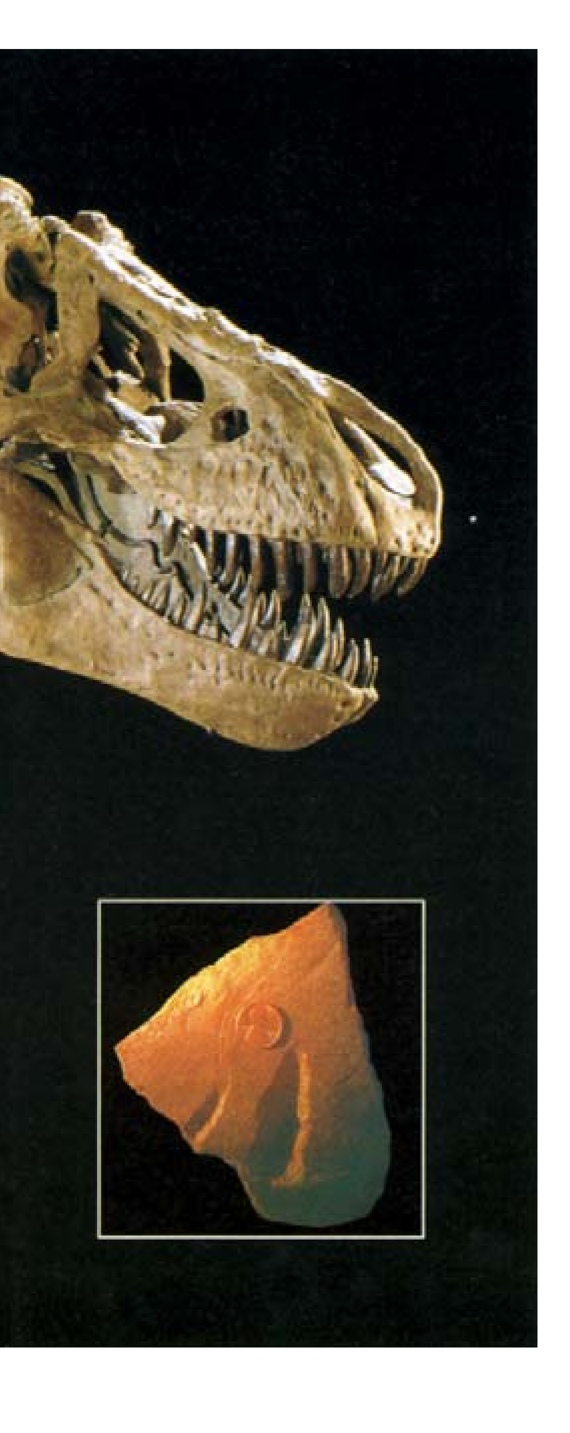
En los últimos diez años ha aparecido una nueva hornada de paleontólogos que han empezado a sacar a la luz algunos de los secretos mejor guardados de *T. rex*. La nueva generación se propone introducir el registro fósil en un contexto vivo, como si quisieran insuflar movimiento a la exhibición estática de los museos. Conforme los paleobiólogos han ido descubriendo claves inéditas, unas nuevas del todo y otras preteridas, *T. rex* se ha ido transformando ante nuestros ojos.

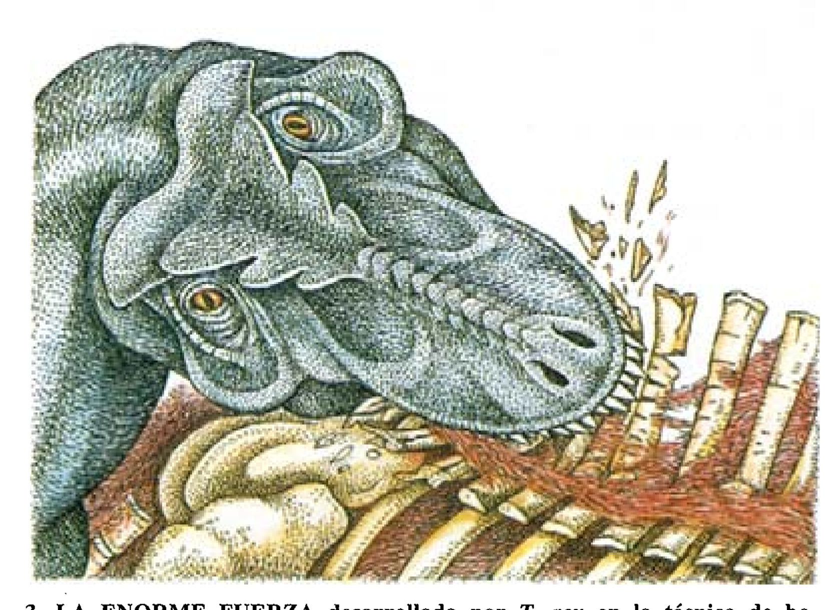
En vez de extraer conclusiones relativas a la conducta sobre la base exclusiva de la anatomía, se exigen ahora pruebas de una actividad real. Los restos esqueléticos de numerosos individuos de *T. rex* arrojan luz sobre la interacción entre ellos mismos y con otras especies. Además, los llamados restos indirectos ("fósiles traza") dan testimonio de determinadas realizaciones a través de pruebas físicas; me refiero a las huellas dejadas por los dientes en los huesos mordidos y las señales de desgaste dentario. De gran valor son también los coprolitos o heces fósiles. (Los restos de los herbívoros *Triceratops* o *Edmontosaurus* en coprolitos de *T. rex* aportan una prueba contundente de la interacción interespecífica.)

Suele aceptarse la premisa de que las especies emparentadas tienden a comportarse de forma similar. En esa línea, se están corroborando los datos de *T. rex* mediante la comparación con los de otros miembros más antiguos de la familia Tyrannosauridae, incluidos sus parientes *Alberto-*

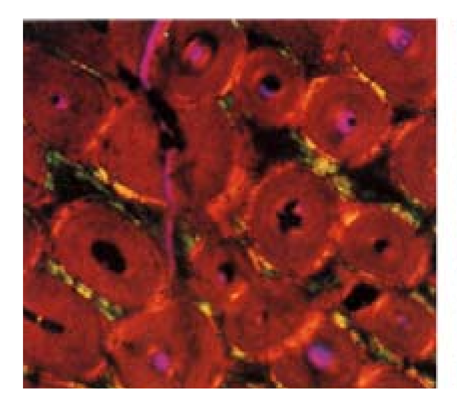
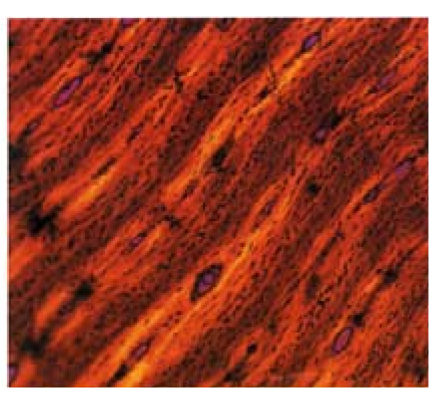


2. PARA MORDER LA COMIDA (*arriba*) ***T. rex*** **empleaba los dientes delanteros. Arrancaba tiras de carne que se apretaban en sitios difíciles, los intercostales, por ejemplo.**





3. LA ENORME FUERZA desarrollada por ***T. rex*** **en la técnica de bocado "morder y arrancar"** (*arriba*) **fue suficiente para formar surcos profundos en la superficie de la pelvis de** ***Triceratops*** **del recuadro de la izquierda. El cuerpo enorme de** ***T. rex*** (*esqueleto de la izquierda*) **y su poderosa musculatura cervical le permitían "arrancar" de cuajo.**

4. LA MICROESTRUCTURA DEL HUESO revela la edad del animal estudiado. Los individuos más viejos tienen huesos constituidos por canales haversianos (*grandes círculos a la izquierda*), túbulos óseos que han reemplazado de forma natural la estructura aleatoriamente orientada del hueso más joven (*derecha*). El análisis microscópico del hueso ha revelado que los individuos considerados en un comienzo especies de talla menor eran en realidad juveniles de *T. rex*.

saurus, *Gorgosaurus* y *Daspletosaurus*, que forman en conjunto el grupo de los albertosaurios.

¿Individualista o gregario?

En *Parque Jurásico* y en otras figuraciones los tiranosaurios van por libre, solitarios. Pero las pruebas se acumulan en otra dirección. Nos hablan de un comportamiento gregario en *T. rex*, al menos durante ciertos momentos de su vida. Destacan a este respecto dos excavaciones de *T. rex* en la Formación Hell Creek, de Montana oriental.

En 1966, un equipo del Museo del Condado de Los Angeles se disponía a exhumar un adulto de *T. rex* en Hell Creek, cuando se encontraron con la sorpresa de un ejemplar bastante menor encima. De entrada se atribuyó el segundo espécimen a tiranosaurios de talla menor. Tras el examen de las pruebas histológicas —la microestructura de los huesos— he llegado a la conclusión de que el segundo animal era un juvenil (*véase la figura 4*). Se produjo otro hallazgo similar durante la excavación de "Sue", el fósil mayor y más completo de *T. rex* jamás recuperado. Sue debe su fama extra al precio que se pagó por su subasta: 8,36 millones de dólares. Posteriormente, en la cantera de Sue, se hallaron restos de un segundo adulto, un juvenil y de una cría. Los investigadores que trabajaron en la Formación Hell Creek, el autor de este artículo incluido, coinciden en que es difícil que distintos *T. rex* solitarios acabaran enterrados juntos. La explicación verosímil y de sentido común aboga por considerarlos parte de un mismo grupo.

Un hallazgo de 1910, más espectacular aún, respalda la conducta gregaria de los Tyrannosauridae. Un equipo de investigadores, procedente del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, que trabajaban en la canadiense Alberta, encontraron un yacimiento de huesos —un depósito con fósiles de muchos individuos— que contenía nueve ejemplares por lo menos del grupo de los albertosaurios, parientes de *T. rex*.

Philip J. Currie y su equipo, del Real Museo Tyrrell de Paleontología en Alberta, han reubicado el descubrimiento de 1910 y realizado una investigación pormenorizada de la asociación de fósiles. Semejante congregación de carnívoros acontece cuando caen en una trampa, un pozo de barro o los sedimentos blandos de las riberas, donde suele quedar atrapada la presa perseguida. En estas circunstancias, sin embargo, la reunión de fósiles debería contener también los restos del herbívoro cazado. La ausencia del vegetariano entre los albertosaurios (y entre los cuatro *T. rex* que incluyen a Sue) indica que el grupo formaba una unidad natural y perecieron juntos por culpa de la sequía, la enfermedad o el anegamiento.

Examinando los restos, Currie estima que el tamaño de los animales oscilaba entre 4 y 9 metros de longitud, variación de tamaños que denuncia que nos hallamos ante un grupo compuesto por juveniles y adultos. Hay un sujeto notablemente mayor y más robusto que los otros. Aunque podría tratarse de un albertosaurio de especie diferente, no parece probable la mezcolanza. Si estos parientes de *T. rex* presentaban una estructura social, el individuo preeminente podría haber sido el patriarca o matriarca del rebaño.

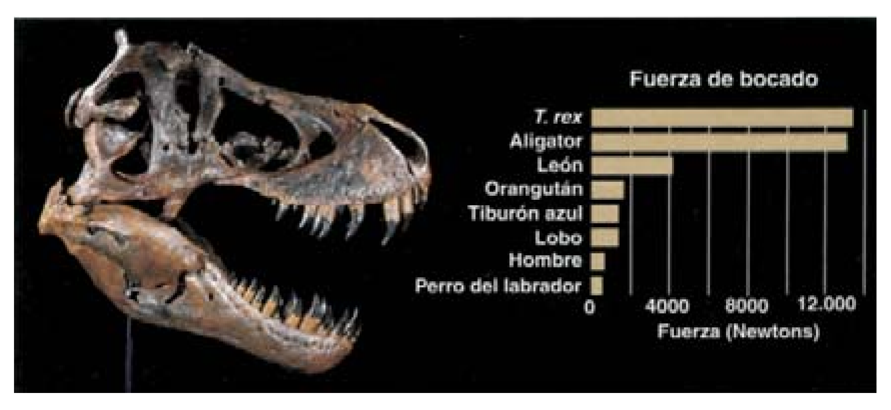
Ahora bien, constituye un cuadro radicalmente novedoso la representación gregaria de los tiranosaurios, implicados en complejas interrelaciones intragrupales. Pero ni siquiera entonces la ciencia les concede estatuto de animales pacíficos. Algunas señales de la interacción grupal de *T. rex* son dentelladas curadas en parte, que revelan un comportamiento harto violento entre ellos. En un trabajo reciente, Currie y Darren Tanke, del Museo Tyrrell también, insisten en ese aspecto. Tanke es una autoridad en paleopatología, ciencia que estudia lesiones y enfermedades en el pasado remoto. Ha detectado un patrón característico en los mordiscos de los terópodos, grupo de dinosaurios carnívoros que abarca a *T. rex* y a otros tiranosaurios. Las marcas en cuestión dibujan surcos acanalados o puntuales a ambos lados del hocico, en los costados o parte inferior de las mandíbulas y, ocasionalmente, en la zona superior y posterior del cráneo.

Para interpretar las señales de las heridas, Tanke y Currie reconstru-

5. ESTE COPROLITO, de tiranosaurio quizá, mide 44 centímetros de longitud. Semejante talla no la alcanza ningún carnívoro conocido. Por su talla, edad, contenidos y contexto geográfico pertenece probablemente a *T. rex*.

yeron la pelea entre dinosaurios. De entrada buscaban hundir los dientes de un lado, en vez de atacar de frente. Infieren, además, esa pugna a dentelladas de las señales observadas en las hemimandíbulas de estos tiranosaurios. A tenor de esas muescas, los agonistas mantenían las cabezas parejas durante la confrontación. Dada la magnitud de algunas heridas fósiles, se desprende que *T. rex* no se andaba con remilgos a la hora de castigar a su oponente de la misma especie. Uno de los tiranosaurios estudiados por Tanke y Currie muestra un diente "de recuerdo" incrustado en la mandíbula agredida, regalo quizá de su adversario.

La alimentación, el apareamiento y la posesión de un territorio serían los motivos de enfrentamientos violentos. Mas, cualquiera que fuese la causa desencadenante de la pelea, el registro fósil muestra que el comportamiento era siempre el mismo. Las lesiones entre jóvenes parecen haber sido más habituales, por la razón verosímil de que un juvenil es susceptible de ser atacado por individuos de su edad y también por adultos de mayor talla. (No obstante, el registro fósil puede presentarse sesgado, con pruebas más numerosas de heridas en jóvenes *T. rex*. En los adultos ciertas heridas curarían con el tiempo, borrando las señales. Pero los juveniles se hallaban más expuestos a morir si sufrían la dentellada del adulto, portándose a la tumba las marcas crueles.)



6. EL GRAFICO DE LA FUERZA DEL BOCADO revela que *T. rex* es el campeón indiscutible. Dennis R. Carter, bioingeniero de la Universidad de Stanford, y el autor simularon la producción de marcas de bocado utilizando el molde de un diente de *T. rex* sobre una pelvis de vaca. Ello produjo un resultado prudente, de 13.000 newtons para cada lado de la boca.

Mordiscos y bocados

Imaginemos el gran colmillo de un babuino o de un león. Superpongamos a esa imagen la de una boca enorme, llena de dientes caniniformes del tamaño de un clavo de traviesa de tren y bordes aserrados. A pesar del evidente potencial de tales dagas, creían los paleontólogos que escaseaban las marcas de dentelladas. Los contados hallazgos publicados antes de 1990 consistían en breves alusiones dispersas en artículos centrados en otros descubrimientos más sugestivos; las claves contenidas en los restos fósiles que denunciaban algún aspecto del comportamiento escapaban al análisis.

Con todo, hubo investigadores que reflexionaron sobre los dientes. Ya en 1973, Ralph E. Molnar, del Museo de Queensland, especulaba sobre la fuerza de la dentadura, fundándose en la morfología. Más tarde, James O. Farlow, de la Universidad de Purdue, y Daniel L. Brinkman, de la Universidad de Yale, llevaron a cabo estudios morfológicos sobre la dentición de los tiranosaurios y determinaron que su robustez se fundaba en su sección transversal redondeada, que les haría soportar la resistencia de los huesos en el proceso masticador.

En 1992, aportaba el autor nuevo material en respaldo de esa idea. Kenneth J. Olson, pastor luterano que recogía fósiles para el Museo de las Montañas Rocosas, vino a verme con diversos especímenes. Trajo una pelvis incompleta que medía 1,5 metros de longitud por un metro de ancho; pertenecía a un *Triceratops* adulto; también recolectó un fragmento del dedo de un pie de un *Edmontosaurus* adulto (dinosaurio de pico de pato). Examiné los especímenes de Olson; observé que ambos huesos estaban dañados con surcos y marcas redondeadas de hasta 12 centímetros de longitud y varios de profundidad. La pelvis de *Triceratops* presentaba unas 80 señales. Estudié el tamaño y forma de las marcas; de las más profundas hice moldes con masilla dental. Los dientes responsables de esas huellas distaban unos de otros 10 cm. Los hoyuelos hendidos tenían una sección transversal cóncava. No cabía duda de que las piezas dentarias portaban carenas aserradas (bordes cortantes elevados) en la cara anterior y posterior. Tomados en su conjunto, los indicios apuntan hacia a *T. rex* como autor de las improntas.

El hallazgo ofrecía valiosas pistas para adentrarse en la conducta. Confirmaba que *T. rex* se alimentaba de *Triceratops* y *Edmontosaurus*, muy comunes en su tiempo. Además, la disposición y forma de las heridas abría una nueva ventana a la conducta alimentaria de *T. rex*, que evidencia dos estrategias diferentes; una consistía en "morder y arrancar", es decir, dar un profundo bocado y tirar con fuerza produciendo desgarros. Así procedió *T. rex* con la pelvis de *Triceratops* hallada por Olson. Pero *T. rex* recurría también al mordisco corto con los dientes frontales (incisiformes); aprehendía y arrancaba a bocados la carne intercostal, donde el hocico de la bestia podía llegar. Este método dejaba en el hueso surcos paralelos y alineados en vertical.

En muchos casos, las marcas de la pelvis de *Triceratops* distaban entre sí pocos centímetros, como si *T. rex* hubiera extraído progresivamente la carne, a la manera de quien se come una mazorca de maíz. Con cada bocado arrancaba algo de hueso. Imaginamos que se lo comía también. La confirmación no tardó en llegar, de donde menos esperábamos.

En 1997 Karen Chin, del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos, recibió una masa fósil, informe, excavada por un equipo del Museo Real de Saskatchewan. El objeto, que pesaba 7,1 kilogramos y medía 44 por 16 y por 13 centímetros, resultó ser un coprolito de *T. rex*. El espécimen, el primero convincente de un terópodo y más del doble del mayor coprolito conocido de un carnívoro, estaba lleno de hueso pulverizado. Aplicando de nuevo métodos histológicos, Chin y el autor establecieron que el hueso pulverizado procedía de un joven dinosaurio herbívoro. *T. rex* ingirió parte de los huesos y, además, los digirió parcialmente con poderosas enzimas y ácidos estomacales.

GREGORY M. ERICKSON ha venido estudiando los dinosaurios desde 1986. Ahora se ha centrado en la investigación de la forma, función, desarrollo y evolución del esqueleto de *Tyrannosaurus rex*. Ha recibido varios premios, entre ellos, el Romer de la Sociedad de Paleontología de Vertebrados.

En la línea de Farlow y Molnar, Olson y el autor sostienen que, pese a la escasez de pruebas, *T. rex* tuvo que dejar muchas señales de sus dientes. La inexistencia de pruebas no es prueba de inexistencia. Dos factores podrían explicar semejante vacío en el registro fósil. En primer lugar, no ha habido una búsqueda sistemática de las dentelladas. Y lo que es más importante, los recolectores se han venido mostrando reticentes ante especímenes mellados por los mordiscos. Desde siempre, los museos preferían esqueletos completos en vez de simples partes aisladas. Pero los esqueletos enteros suelen proceder de animales que han muerto por causas distintas de la depredación y quedaron prestamente enterrados, antes de que acudieran carroñeros que los desmembraran. Los huesos con señales que los museos evitaban, como la pelvis de *Triceratops*, son precisamente los especímenes que mejor conservan las pruebas de la estrategia alimentaria.

Aase Roland Jacobsen, del Museo Tyrrell, ha estudiado restos esqueléticos parciales, sueltos, y los ha comparado con esqueletos completos de Alberta. Descubrió que los huesos aislados presentaban unas 3,5 veces más marcas de mordisco (14 por ciento) que el resto de los ejemplares (4 por ciento).

¿Halcón o buitre?

Algunos rasgos de la biología de los tiranosaurios —coloración, sonidos emitidos o cortejo de apareamiento— podrían permanecer ocultos en el misterio. Pero podemos abordar su conducta alimentaria estudiando el registro fósil. La recolección de nuevos restos indirectos podría, por fin, acabar con una polémica paleontológica que dura ya 80 años: resolver si *T. rex* fue depredador o carroñero.

Cuando se descubrió *T. rex* hace un siglo, se le incluyó de inmediato entre los depredadores. Pero unas garras afiladas y unas mandíbulas poderosas no convierten a nadie forzosamente en depredador. Sin ir más lejos, la mayoría de los osos son omnívoros y matan sólo para procurarse un pequeño porcentaje de su dieta. En 1917, Lawrence Lambe, paleontólogo canadiense, examinó el cráneo de un albertosaurio y dedujo que los tiranosaurios se alimentaban de carroña reblandecida. Llegó a esta conclusión tras observar la ausencia de desgaste dentario. (Las investigaciones ulteriores demostrarían que el 40 por ciento de los dientes de los tiranosaurios aparecen desgastados y rotos, algo que, basado en mis estimaciones de la tasa de reemplazamiento dentario, debía ocurrir en un período de dos o tres años.) De ese modo, Lambe adelantaba la opinión minoritaria que los consideraba unos enormes "buitres" terrestres. Los argumentos aducidos en la disputa entre partidarios de la depredación y defensores del hábito carroñero se han centrado en las posibilidades anatómicas y físicas de *T. rex*, dando lugar a un juego de punto-contrapunto.

Los partidarios de la postura carroñera adoptaban la "teoría de la debilidad dentaria", según la cual los dientes alargados de *T. rex* hubieran llevado las de perder en lides depredadoras o no hubieran resistido morder en hueso. También aducían que sus brazos diminutos descartaban cualquier ataque letal, sin olvidar que *T. rex* habría sido demasiado lento para atrapar una presa.

Los partidarios de la postura depredadora respondían con datos biomecánicos. Citaban mis propios estudios sobre dinámica del bocado que demostraban que los dientes de *T. rex* eran muy robustos. (Por mi parte, me propuse no entrar en el debate hasta que no aparecieran pruebas físicas directas.) Replicaban con datos de Kenneth Carpenter, entonces en el Museo de las Montañas Rocosas, quien había estimado que los brazos "insignificantes" de *T. rex* podían doblar un peso de 180 kilogramos. Esgrimían, además, el trabajo de Per Christiansen, de la Universidad de Copenhague, quien, basado en las proporciones de las extremidades, exponía que *T. rex* podía haber alcanzado 47 kilómetros por hora. Velocidad superior a la de cualquier contemporáneo suyo, aunque la resistencia y la agilidad, difíciles de cuantificar, debieran entrar también en esa consideración.

No bastan las investigaciones biomecánicas para resolver el debate depredador-carroñero. No bastarán nunca. En vez de especular sobre su adaptación a la caza, el determinante crítico que nos llevará al nicho ecológico de *T. rex* se esconde en el modo y la intensidad con que utilizaba los animales de su entorno. Los dos grupos discrepantes admiten que los animales depredadores, pensemos en leones o hienas manchadas, carroñearán en alguna ocasión, y que los carroñeros clásicos, como los buitres, podrán a veces depredar. Atendidas las pruebas físicas, forzoso es inferir que los tiranosaurios cazaban y carroñeaban.

Se han hallado horizontes estratigráficos con huesos de cientos o miles de individuos de edmontosaurios que murieron por inundaciones, sequías u otras causas distintas de la depredación. La presencia de marcas de bocados y restos de fragmentos dentarios indican una actividad carroñera por parte de *T. rex*. Jacobsen ha encontrado pruebas parecidas de carroñeo de albertosaurios. Por otro lado, Carpenter ha aportado sólidas pruebas de un comportamiento depredador cuando describe cierto ataque frustrado de un *T. rex* sobre un ejemplar adulto de *Edmontosaurus*. La presa logró escapar con varios huesos de la cola rotos, que después sanaron. El único animal dotado de talla, dentición y fuerza de bocado suficientes para provocar la lesión señalada era *T. rex*.

La cuantificación de estos hallazgos ayuda a determinar la frecuencia con que *T. rex* optaba por una estrategia alimentaria u otra. Nos ahorraríamos disputas bizantinas si hubiera una definición aceptada por todos de qué sea un depredador y a qué llamar carroñero. Tal acuerdo es necesario, si queremos poner rigor en paleontología de vertebrados. Para ciertos radicales, si un carnívoro consume carroña, hay que considerarlo carroñero. Con semejante óptica, aves y mamíferos carnívoros serían carroñeros, con pocas salvedades.

Más coherente con las categorías paleontológicas de sentido común sería la definición de depredador que remitiese a la especie cuya mayoría de individuos se alimentaran principalmente de caza. En las especies carroñeras, no se exigiría que la mayoría de sus miembros fueran responsables de las muertes que les abastecen.

Los restos indirectos podrían facilitar un planteamiento riguroso de la polémica, cuya solución podría emerger de la contrastación entre hipóte-

sis sobre preferencias alimentarias de los tiranosaurios. Jacobsen advierte que las pruebas de la preferencia por animales menos peligrosos o de fácil caza respalda la tesis depredadora. De los carroñeros hemos de esperar que consuman cualquier especie por igual.

Así planteadas las cosas, Jacobsen aporta pruebas en favor del comportamiento depredador. Estudió miles de huesos de dinosaurios procedentes de Alberta y comprobó que los hadrosaurios inermes presentaban el doble de marcas de dientes producidas por tiranosaurios que los ceratopsios, mucho más peligrosos al estar armados con cuernos. Tanke, quien participó en la recolección de estos huesos, agrega la ausencia de tales hendiduras en ankylosaurios, enormes y bien protegidos.

Jacobsen pide cautela. Algunos factores podrían sesgar la interpretación de los hallazgos. La mayoría de los huesos de hadrosaurios proceden de individuos aislados, en tanto que las muestras de ceratopsios se han desenterrado de lechos estratigráficos con numerosos individuos. Estos yacimientos albergan más animales completos, ilesos, lo que constituye un posible factor distorsionador. Sería de agradecer una investigación sobre ceratopsios aislados. En otro orden, el análisis de más intentos de depredación frustrados, como el descrito por Carpenter, podrían revelarnos si se da mayor preferencia por presas menos peligrosas.

Por Jacobsen conocemos el carácter excepcional del canibalismo entre los tiranosaurios. Sólo un 2 % de los huesos de albertosaurios presentan la señal de la dentellada; en los herbívoros la proporción sube al 14 %. De ahí podrían inferirse las tendencias depredadoras, no carroñeras, de *T. rex*, en particular si se tratara en verdad de una especie gregaria. Suponiendo que los tiranosaurios no tuvieran aversión a consumir carne de su propia especie, cabría esperar un porcentaje de marcas parecido al de los herbívoros. Un *T. rex* carroñero se volcaría sobre restos de herbívoros, pero si *T. rex* hubiera viajado en rebaño, la carne de sus congéneres recién muertos hubiera sido también una garantía de alimento.

Los coprolitos podrían aportar pruebas significativas sobre los hábitos alimentarios de *T. rex*. Admitido que el examen histológico de los huesos contenidos en los coprolitos puede indicarnos la edad aproximada en que fue consumido el animal, Chin y yo creemos que del estudio de las heces fósiles se desprenderá si *T. rex* tendía a alimentarse de individuos vulnerables del rebaño, los más jóvenes por ejemplo. Tal sesgo denunciaría una estrategia depredadora, mientras que un resultado más equilibrado indicaría un comportamiento carroñero.

A lo largo de este siglo, los paleontólogos han hallado suficientes fósiles de *Tyrannosaurus rex* y pueden ofrecer una descripción pormenorizada de la apariencia del monstruo. Para averiguar su modo de vida hemos de apoyarnos en fósiles que contengan pistas de interés. Los paleontólogos son conscientes de la necesidad de reestudiar hallazgos que se dejaron de lado y reconocen el sesgo de las prácticas recolectoras, que terminaron por obscurecer la percepción genuina del mundo de los dinosaurios. La profundización en el conocimiento de su conducta traerá consigo una comprensión más exhaustiva de la paleobiología de los dinosaurios. Por no mencionar la aplicación de nuevas técnicas, que extraerán información de fósiles reputados de escaso valor. *T. rex*, vivo en nuestra imaginación, continúa evolucionando.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CARNOSAUR PALEOBIOLOGY. Ralph E. Molnar y James O. Farlow en *Dinosauria*. Dirigido por David B. Weishampel, Peter Dodson y Halszka Osmolska. University of California Press, 1990.

THE COMPLETE *T. REX*. John Horner y Don Lessem. Simon & Schuster, 1993.

BITE-FORCE ESTIMATION FOR *TYRANNOSAURUS REX* FROM TOOTH-MARKED BONES. Gregory M. Erickson, Samuel D. van Kirk, Jinntung Su, Marc E. Levenston, William E. Caler y Dennis R. Carter en *Nature*, vol. 382, págs. 706-708; 22 de agosto, 1996.

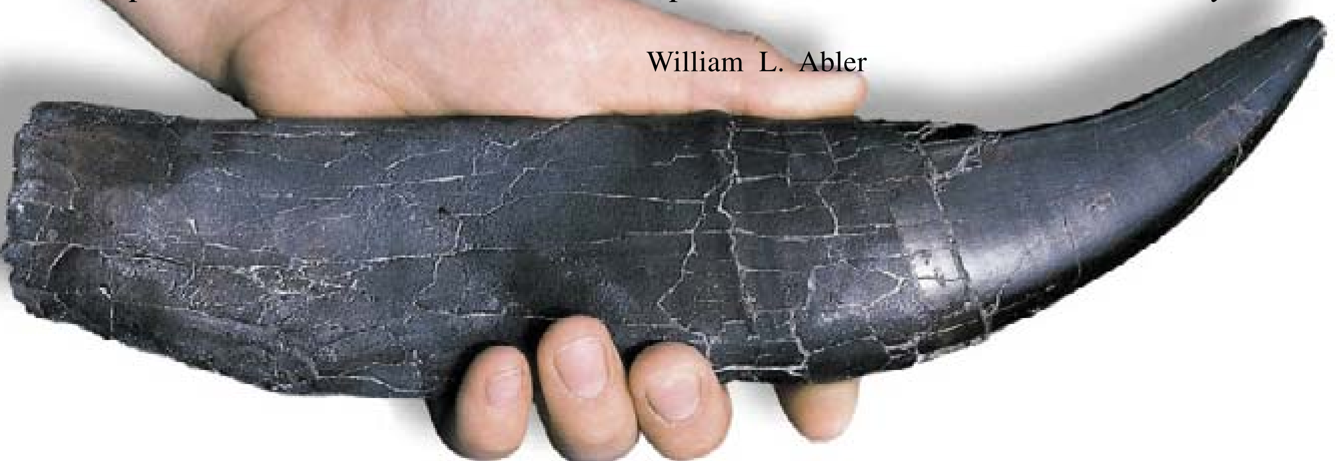
INCREMENTAL LINES OF VON EBNER IN DINOSAURS AND THE ASSESSMENT OF TOOTH REPLACEMENT RATES USING GROWTH LINE COUNTS. Gregory M. Erickson en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n.º 25, págs. 14623-14627; 10 de diciembre, 1996.

A KING-SIZED THEROPOD COPROLITE. Karen Chin, Timothy T. Tokaryk, Gregory M. Erickson y Lewis C. Calk en *Nature*, vol. 393, páginas 680-682; 18 de junio, 1998.

Dientes de tiranosaurio

Las piezas dentarias nos revelan aspectos de sus hábitos de caza y alimentación

William L. Abler



1. DIENTE de tiranosaurio. Macizo, sólo emergería de la línea delimitada por las encías la cuarta parte de su longitud (*sección lisa de la derecha*).

El conocimiento de la estructura dentaria resulta decisivo para reconstruir los hábitos de caza y alimentación de los tiranosaurios. El diente de tiranosaurio era una suerte de cono, ligeramente curvado y comprimido; en sección transversal dibuja una elipse. Las superficies anterior y posterior contienen hileras en sierra (crenuladas); de ahí que muchos pensaran que cortaba la carne como un cuchillo de sierra. Mis compañeros y yo, sin embargo, no logramos dar con un estudio definitivo que estableciera el proceso exacto de corte del cuchillo, fuera liso o en sierra. No nos quedó otro remedio que acometer nosotros el estudio comparado entre los dientes de tiranosaurios y los cuchillos.

Fiado en la lógica de la evolución, di por sentado que los dientes de tiranosaurios se hallaban adaptados para cumplir sus funciones biológicas. Aunque la investigación directa de los dientes pareciera el mejor camino para comprender sus características, hay cortapisas para tal abordaje. No podemos usar los dientes en experimentos controlados: resulta imposible doblar la profundidad de las muescas en sierra de un diente fósil para observar los cambios consiguientes en las propiedades de corte. Opté, pues, por cuchillos de acero cuyas hojas dentadas o lisas pudiera modificar y así comparar luego los resultados con dientes reales de tiranosaurio.

El filo cortante de los cuchillos puede ser liso o en diente de sierra. La cuchilla lisa viene definida por el ángulo que forman las dos caras y el radio del filo cortante: cuanto menor sea el radio, más cortante el filo. Las hojas en diente de sierra, por contra, se caracterizan por la profundidad de la muesca y la distancia entre dientes.

Para investigar las propiedades de cuchillos con diversos filos e indentaciones, fabriqué varios lisos con distinto ángulo interfacial. Normalicé el radio de corte para poder comparar resultados; cuando el filo de corte no era visible a 25 aumentos, no lo afilaba más. Fabriqué otros tantos de borde serrado.

Para medir las propiedades de corte de las cuchillas, las monté sobre una sierra de carnicero, que operaba con cuerdas y poleas que movían las hojas a través de unas piezas de carne similares y dispuestas sobre una tabla de tajar. Con pesas apiladas en cajitas en los extremos de las cuerdas, medí la fuerza de compresión y la fuerza de estiramiento requeridas para cortar cada trozo de carne hasta una misma profundidad. Este simple experimento produjo resultados consistentes y provocadores; entre ellos, uno muy importante y quizás obvio: las cuchillas lisas cortan según una pauta completamente distinta de la seguida por las hojas serradas.

La cuchilla serrada corta la carne por medio de un mecanismo de “agarrar y desgarrar”. Cada diente penetra hasta una distancia igual a su propia longitud, aislando un segmento de carne entre él y el diente adyacente. Conforme avanza la hoja, cada diente desgarra su propia sección aislada. La cuchilla alcanza una distancia igual a la profundidad de los dientes; el proceso se repite. Por consiguiente, la cuchilla convierte una fuerza de tracción en una fuerza de corte.

La cuchilla lisa, sin embargo, concentra su fuerza descendente en un borde muy fino de corte. Cuanto más afilado, mayor será la fuerza ejercida. En efecto, el borde aplasta la carne hasta que ésta se raja, de modo que afilando la cuchilla se reduce la superficie de fricción entre el filo y la carne.

WILLIAM L. ABLER recibió su doctorado en lingüística por la Universidad de Pennsylvania en 1971. Siguiendo con sus estudios posdoctorales de neuropsicología en la Universidad de Stanford, ingresó en la facultad de lingüística del Instituto de Tecnología de Illinois. Su interés en el origen y evolución humanos le indujo a abordar modelos animales y también investigar los dinosaurios, especialmente sus cerebros.

Terminadas estas observaciones, monté dientes serrados reales en el dispositivo experimental. Obtuve algunos resultados inesperados. El diente serrado de un tiburón fósil (*Carcharodon megalodon*) actúa exactamente igual que el filo serrado. Pero el borde serrado del diente más cortante de tiranosaurio saja la carne a la manera del filo de un cuchillo liso. Cierto es que no todos los filos en diente de sierra son iguales; pero ese dibujo es característica sobresaliente de los dientes de tiranosaurios. ¿Serviría ese rasgo para otras funciones, además de la de cortar?

La estructura crenulada del diente de tiburón presenta forma piramidal; la del tiranosaurio se acerca más a la cúbica. Hemos de resaltar dos rasgos de interés, el intervalo entre crenulaciones, o celda, y la fina ranura en que la celda se estrecha, o diáfisis. Dispuesto a comprobar las posibles funciones de celdas y diáfisis, utilicé un diente de tiranosaurio para cortar carne fresca. Por lo que sé, era la primera vez que un diente de tiranosaurio cortaba carne fresca desde hacía 65 millones de años.

Examiné luego el diente bajo el microscopio. No me defraudó lo que vi. (Para estos experimentos de corte empleé dientes de albertosaurio, tiranosaurios genuinos y parientes cercanos de *T. rex*.) Las celdas constituyen excelentes trampas para la grasa y otros desperdicios. También proporcionan acceso hasta las diáfisis, más profundas, que agarran y retienen filamentos de los tendones de las víctimas. Los dientes de tiranosaurio podrían haber alojado así pequeñas cantidades de carne y grasa durante prolongados períodos de tiempo. Tales partículas alimenticias son receptáculos ideales de bacterias sépticas: bastaría un leve mordisquito de tiranosaurio para provocar una infección fatal.

Merece atención también otro aspecto de los dientes de tiranosaurio. Las crenulaciones adyacentes no se juntan en el borde exterior del diente. Permanecen separadas durante un recorrido igual al de su propia altura. Allí donde terminan por encontrarse, la ampolla, tiene forma de U. Según parece, esta estructura protege la integridad del diente cuando sufre la presión de una fuerza. Si la angosta abertura de la diáfisis ejerce una intensa presión sobre los filamentos tendinosos atrapados, la ampolla redondeada distribuye uniformemente la presión sobre la superficie. En virtud de ello, la ampolla eliminaba cualquier exceso dinámico concentrado en un punto que pudiera dañar el diente.

Por lo que parece, la fuerza monstruosa de los tiranosaurios no necesitaba dientes navajeros, aunque sí exigía una dentición peculiar. Menos cuchillos que pinzas en su operación, agarraban la comida. Las ampollas protegían los dientes durante el proceso.

Un carácter adicional de su anatomía dentaria da a entender que *T. rex* no masticaba la comida. Los dientes carecen de superficie oclusiva, articulada; raramente se tocaban unos con otros. Tras arrancar una gran porción de carne, el tiranosaurio se la tragaría entera.





2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL (*arriba*) para medir las fuerzas de corte de diversas cuchillas: las pesas prendidas de cuerdas a los lados y en el centro provocan que la cuchilla produzca un corte estándar de 10 milímetros en una muestra de carne (*representada aquí por plastilina verde*). Debajo, una imagen ampliada de una serie de filamentos de tendones atrapados entre las crenulaciones de un diente de tiranosaurio.

La información suministrada por otros dominios de la investigación nos ayuda a reconstruir los hábitos de caza y alimentación de los tiranosaurios. Walter Auffenberg, herpetólogo de la Universidad de Florida, pasó más de 15 meses en Indonesia estudiando el mayor lagarto del mundo, el dragón de Komodo, animal que, en opinión del paleontólogo James O. Farlow, de la Universidad de Indiana-Purdue en Fort Wayne, podría servir de modelo actual para entender el comportamiento de los tiranosaurios. La estructura dentaria del dragón es muy similar a la de los tiranosaurios, y sabemos que aquél produce mordeduras letalmente tóxicas: sobreviene pronto la muerte al animal que suele escapar con vida en un duelo con él. El bocado infeccioso de los tiranosaurios respaldaría la hipótesis de quienes los consideran depredadores. Igual que con los dragones de Komodo, el animal que escapase a un ataque acabaría víctima de una infección fatal. La presa muerta o moribunda constituiría fácil pitanza del tiranosaurio, la hubiera atacado él o cualquier congénere suyo.

Si una de las armas de los tiranosaurios fuese disponer de una flora bucal infecciosa, podríamos aventurar otras condiciones anatómicas. Con el fin de mantener un ambiente estable para estos huéspedes unicelulares, los tiranosaurios poseían probablemente labios que se podrían cerrar con fuerza así como grandes encías esponjosas rodeando los dientes. Cuando comían, la presión entre dientes y las encías podría cortar éstas haciéndolas sangrar, de modo que esta sangre sirviese a su vez de alimento para las bacterias. Se dibujaría un cuadro en que la estampa terrorífica del tiranosaurio alimentándose se intensificaría todavía más con una boca enrojecida por saliva teñida de su propia sangre.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SERRATED TEETH OF TYRANNOSAURID DINOSAURS, AND BITING STRUCTURES IN OTHER ANIMALS. William Abler en *Paleobiology*, vol. 18, n.º 2, págs. 161-183; 1992.

TOOTH SERRATIONS IN CARNIVOROUS DINOSAURS. William Abler en *Encyclopedia of Dinosaurs*. Dirigido por Philip J. Currie y Kevin Padian. Academic Press, 1997.

Emigración mexicana hacia Estados Unidos

La población mexicana del sudoeste de los Estados Unidos es resultado de un largo proceso de migración y expansión demográfica que antecede a la creación de la frontera entre México y los Estados Unidos

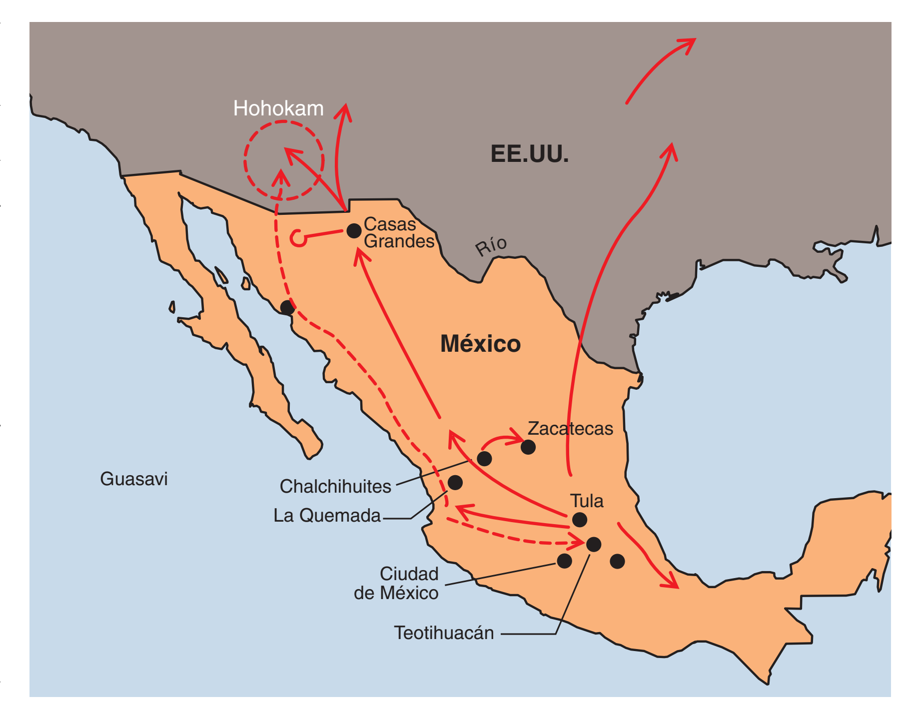
Carlos G. Vélez Ibáñez

La frontera actual entre México y los Estados Unidos entraña un largo contencioso histórico. La primera demarcación divisoria se creó en 1836 cuando Texas se disgregó de México y fue anexionada por Estados Unidos en 1845. La segunda, en 1848, cuando los Estados Unidos invadieron México y se apropiaron por la fuerza de zonas de Colorado, Nuevo México y California. La tercera, la Adquisición Gadsden de 1853, fue una venta de territorios del sur de Arizona obligada también por el ya poderoso vecino.

Pero la frontera no ha borrado la afinidad manifiesta entre los habitantes a uno y otro lado de la raya. Por eso llamaré "mexicanos" a todas las personas de origen mexicano nacidas en México o en Estados Unidos. Distinguiré entre "nativos" (nacidos en Estados Unidos) y "extranjeros" (nacidos en México). Emplearé el término "hispano-mexicano" cuando lo crea históricamente apropiado por perdurar la tradición del mismo iniciada en el siglo XVII.

Los movimientos e intercambios entre el norte de Mesoamérica y el sudoeste de la América del Norte se hicieron frecuentes desde el siglo IV d.C., si no antes. Semillas de cereales, frijoles, cidras y chiles, originarios del México central, se habrían ya difundido por el sudoeste de Estados Unidos hacia el 1500 a.C. Se ignora si fueron llevados por alguien, si los hizo llegar el viento o si fueron casuales aportaciones de los sistemas de transporte fluvial.

En Arizona existen por lo menos 189 campos de pelota mesoamericanos en los que se desarrollaba el "ule", juego parecido al baloncesto que debió de aparecer mucho más al sur. Hay también otras pruebas de intercambio comercial de sur a norte entre diversos pueblos, que se realizarían por dos rutas de tráfico principales desde la periferia de Mesoamérica, a lo largo de la costa occidental de México o atravesando el corredor de Sierra Madre, hasta lo que es hoy el sudoeste de Estados Unidos. Antes de la llegada de los europeos, por esas rutas viajaban comerciantes y mercaderes de plumas



1. RUTAS COMERCIALES de Mesoamérica. Los movimientos e intercambios entre el norte de Mesoamérica y el sudoeste de la América del Norte se hicieron frecuentes desde el siglo IV d.C., si no antes. El intercambio comercial se realizaría por dos rutas de tráfico principales desde la periferia de Mesoamérica, a lo largo de la costa occidental de México o atravesando el corredor de Sierra Madre, hasta el sudoeste norteamericano. Por esas rutas viajaban comerciantes y mercaderes de plumas de color rojo escarlata de la sureña Tamalhuipas, amosaicados espejos del México central, campanillas de cobre de Zacatecas, entre otros artículos de lujo, y puede que también alfarería. A cambio, se enviaban a las regiones periféricas de Mesoamérica conchas recogidas en las costas mexicana y californiana del Pacífico y en la del mar de Cortés, turquesas procedentes de Los Cerrillos y pieles de búfalo de las llanuras.

CARLOS G. VELEZ IBAÑEZ es catedrático de antropología y decano del Colegio de Humanidades, Artes y Ciencias Sociales de la Universidad de California en Riverside.

de color rojo escarlata de la sureña Tamalhuipas, amosaicados espejos del México central, campanillas de cobre de Zacatecas, entre otros artículos de lujo, y puede que también alfarería. A cambio, se enviaban a las regiones periféricas de Mesoamérica conchas recogidas en las costas mexicana y californiana del Pacífico y en la del mar de Cortés, turquesas procedentes de Los Cerrillos, y quizá pieles de búfalo de las llanuras.

Estas mismas vías de intercambio les sirvieron en el siglo XVI a los exploradores, misioneros y colonizadores españoles para establecer el Virreinato de Nueva España, que abarcaba los actuales México, Texas, Arizona, California y el sur de Colorado. La mayoría de las ciudades fueron fundadas, como Santa Fe de Nuevo México, en la primera fase de la colonización. En el siglo XVIII surgieron Tucson, en Arizona, y San Antonio, en Texas. Desde San Francisco hasta San Diego tuvieron todas por origen el establecimiento de los colonos hispano-mexicanos que fueron poblando la zona en un período de doscientos años, de 1605 a 1821, fecha esta última en la que México y sus provincias del norte se independizaron de España. La población de colonos estaba formada por campesinos, braceros, artesanos y pequeños comerciantes. Muy pocos pertenecían a la aristocracia terrateniente.

Pero el flujo migratorio no se paró en 1821. La mayoría de los actuales habitantes de la zona descienden de familias venidas desde el centro y el norte de México. Por ejemplo, dos terceras partes de la población adulta de Texas y el 68 % de la de San Antonio emigraron durante un período de 16 años desde el norte (Saltillo, Camargo, Monterrey, Monclova y Río Grande) y centro de México (Querétaro, Ciudad de México y Guadalajara). La tendencia se incrementó a partir del año 1834, con la secularización y expropiación de las misiones.

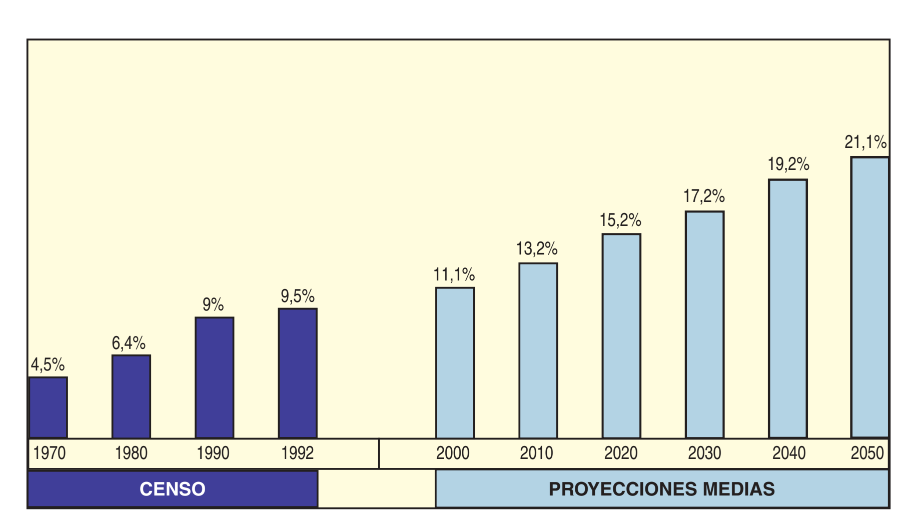
El proceso no lo interrumpió ni siquiera la guerra de 1846 entre México y Estados Unidos, a resultas de la cual el primero perdió casi la mitad de su territorio, los actuales estados del sudoeste de la Unión. El descubrimiento de oro en California atrajo a 25.000 mexicanos "gambusinos" (mineros), que fueron allá desde Sonora en 1848.

La migración del siglo XIX sentó el precedente para episodios sucesivos motivados por los grandes cambios de la economía. El desarrollo de la agricultura tecnificada y de la ganadería, la expansión del ferrocarril y la intensificación de la minería del cobre atrajeron a grandes masas procedentes, sobre todo, de México central.

Pero la migración mexicana no fue siempre lineal ni buscada con carácter totalmente permanente. El trasterrado piensa en retornar algún día, mientras va remitiendo a sus familiares parte del dinero ganado. Tales envíos se emplearon desde comienzos del siglo XX en la adquisición de tierras de cultivo, en la construcción de viviendas y en la creación de negocios.

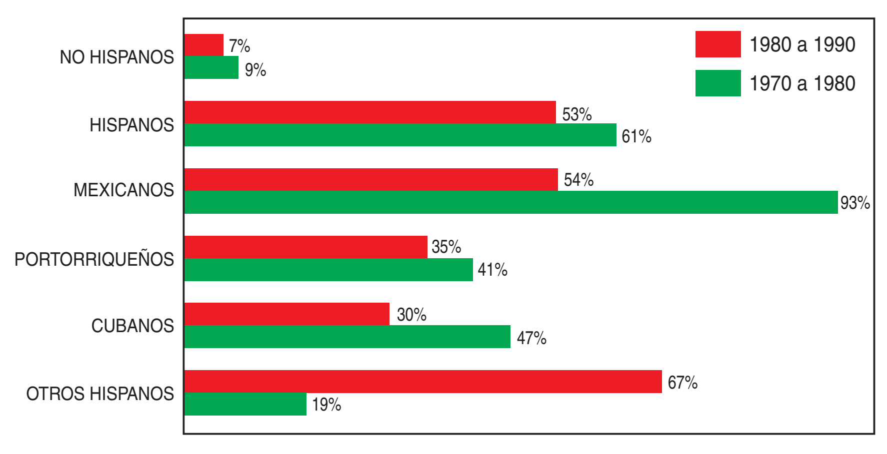
La emigración del siglo XX puede dividirse en dos transiciones demográficas principales: de 1900 a 1929, y de 1960 hasta hoy. Entre los años 1900 y 1929 cruzó la frontera un millón de personas. El fenómeno obedecía a un doble proceso. En primer lugar, al cambio demográfico operado en México, que vio aumentada un 40 % su población de 1876 a 1900. En segundo lugar, la agitación política de la Revolución Mexicana, que duró de 1910 a 1926.

Los mexicanos vieron facilitada su incorporación en el mercado laboral con la Ley de Exclusión de los Chinos, promulgada en 1882, y el Acuerdo entre Caballeros de 1907, medidas ambas que excluían de la agricultura a los asiáticos. Por doquier se abrieron oficinas de contratación para trabajar en los cítricos de California, en la remolacha azucarera de Colorado, Michigan, Minnesota



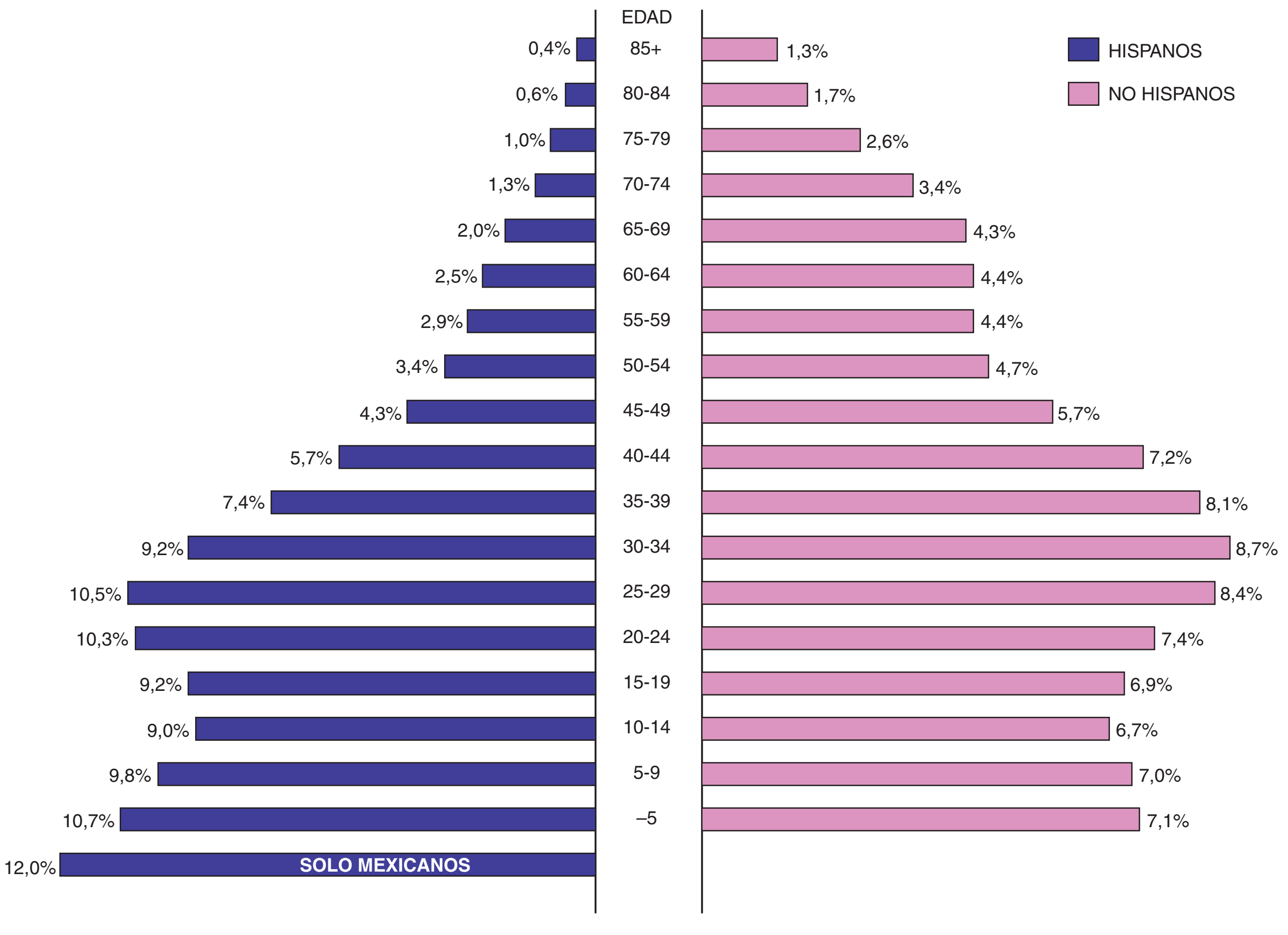
Fuente: U.S. Bureau of the Census, Current Population Reports, p.23-183, Hispanic Americans Today. *U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1993:2*

2. POBLACION HISPANICA en Estados Unidos desde 1970 hasta el 2050, en porcentajes.



Fuente: U.S. Bureau of the Census, Current Population Reports, p.3, Hispanic Americans Today. *U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1993:2*

3. CRECIMIENTO DE POBLACION HISPANA por tipo de origen desde 1970 hasta 1990, en porcentajes.



Fuente: U.S. Bureau of the Census, Current Population Reports, p. 7, Hispanic Americans Today. *U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1993:2*

4. EDAD DE LA POBLACION en 1990. La barra "sólo mexicanos" de las edades 0 a 5 representa el 12 % de la población mexicana y es casi un 75 % mayor que la población anglosajona de la misma edad, debido en gran parte a que la tasa de nacimientos es casi doble que la de la población anglosajona, según la Oficina del Censo de EE.UU.

y Ohio, y en el algodón de Texas, California y Arizona.

Añádase la gran demanda de mano de obra para una minería en auge. El desarrollo de la construcción y el de los ferrocarriles atrajeron también a grandes contingentes de mexicanos hacia Kansas, Illinois, Nueva York y Pennsylvania. Pero fue en el sudoeste donde recaló el grueso de la emigración, en Texas sobre todo, seguida de Arizona y California. Llegaban a Arizona y Texas huyendo de la revolución mexicana, de sus asesinatos, asaltos, incendios y persecución religiosa, que costaron la vida a más de un millón de mexicanos.

En aquel histórico movimiento se fundieron ricos y pobres, instruidos y analfabetos. Las regiones limítrofes quedarían para siempre transformadas con la presencia de una población heterogénea que vino a unirse a familiares o conocidos que vivían ya en Tucson, Albuquerque, El Paso, San Diego o San Francisco. Los inmigrantes traían consigo ideas e instituciones que coincidían con las ya establecidas. Hasta 1929 no se les exigió a los mexicanos visado para entrar en Estados Unidos.

Los que llegaban, por ejemplo, a Tucson desde Sonora solían establecerse en colonias habitadas por otros mexicanos descendientes de los que sólo 50 años antes habían combatido contra los apaches a las puertas mismas del fuerte de Tucson, construido en el siglo XVIII. Los nuevos, gracias a los contactos de sus parientes, encontraban empleo en la construcción, en el ferrocarril, en las serrerías o en los servicios municipales. Los domingos se juntaban en la misa de la iglesia de San Agustín. Se afiliaban a sociedades de ayuda mutua como la *Alianza Hispano-Americana*, fundada a comienzos de los noventa, o creaban otras como la *Sociedad de Beneficencia Porfirio Díaz*, y leían periódicos como *El Fronterizo*, editado en español, mientras sus hijos asistían a la escuela elemental *Ochoa* o celebraban las "quinceañeras" (ceremonias religiosas de la pubertad).

Así se fue amasando la que daría en llamarse generación "mexicano-americana", nacida de padres mexicanos por los años veinte y comienzos de los treinta. Pero el flujo hacia el sudoeste de Estados Unidos cayó a partir de 1929, con sólo 23.000 mexicanos emigrantes durante una década, cuando en los 10 años anteriores habían sido 450.000. Remedo de las deportaciones en masa de las postrimerías del siglo pasado, durante la Gran Depresión de 1929 a 1937 se dictaron medidas draconianas de repatriación por las que medio millón de personas de origen mexicano fueron "voluntariamente" expulsadas.

Una tercera parte tenían ya la ciudadanía norteamericana, en su mayoría niños nacidos en los Estados Unidos, muchos de los cuales no

habían cumplido los quince años. No tardarían esos adolescentes en volver sigilosamente a sus lugares de nacimiento, a tiempo de alistarse para combatir en la Segunda Guerra Mundial. Esa generación mexicana recibió más medallas al valor ganadas en los campos de batalla de Europa y del Pacífico que las que alcanzó cualquier otro grupo cultural de los Estados Unidos.

Aunque de 1930 a 1950 sólo entraron legalmente 83.000 mexicanos, hay que añadir cinco millones más, reclutados en el marco del programa "Bracero", operación de sostén agrícola de la Segunda Guerra Mundial. Pero no decayó la inmigración ilegal. Los que habían trabajado en las faenas agrícolas, se convertían en residentes "ilegales", una vez terminado su contrato.

En 1954 asistimos a un tercer movimiento de deportación en masa, la "Operación Espaldas Mojadas". Supuso la expulsión de más de un millón de mexicanos, lo que creó una pavorosa inquietud en sus barrios, con redadas indiscriminadas incluso a la salida de la misa dominical.

Muchos se escondían en trastiendas, en garajes y en almacenes, huyendo de una fácil identificación y arresto. Aquellos pobres seres de piel atezada y triste mirar pronunciaban un lastimero 'adiós'... hasta la próxima vez en que volvía a vérseles por los mismos sitios. Este proceso, del que fui testigo en mi infancia, no ha dejado de repetirse. Pese a todo, en 1960 era ya mayor el porcentaje de los mexicanos nacidos en Estados Unidos: un 55 por ciento. Según el cálculo más aproximado, nativos y nacidos fuera del país sumaban 5 millones en 1960. Esa cifra en 1990 se había casi triplicado sumando más de 13 millones; constituían el 62 % del total de una población hispana de casi 22 millones. Cabe esperar que, para el año 2050, el número de mexicanos se haya triplicado como mínimo, puesto que esta población aumentó más del 50 % entre 1980 y 1990.

El aumento de la población mexicana entre 1970 y 1990 fue muy superior al de los demás grupos hispánicos. Se discute, sin embargo, si el aumento del 93 % entre los años 1970 y 1980 fue tal o más bien hubo un aumento total del 63,3 %, sumando migración legal e ilegal y teniendo en cuenta las tasas de nacimientos.

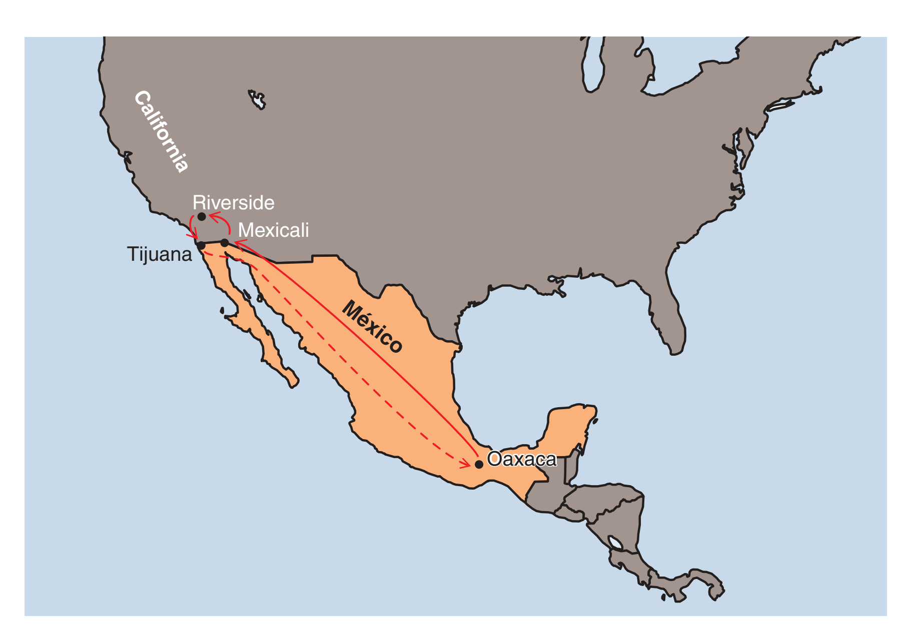
En 1970, el 82,1 % de la población mexicano-estadounidense había nacido en EE.UU. En 1980, los nacidos fuera habían aumentado hasta el 26 %. En 1990, los mexicanos nacidos fuera eran el 33 % y los nativos habían descendido al 67 %. En 1994, el porcentaje de los nacidos fuera había aumentado hasta el 36 % y los nativos eran el 62,3 % sumándoles el resto de nacidos en otras partes, aunque de padres mexicano-estadounidenses.

Más de la mitad de los mexicanos nacidos fuera entraron en EE.UU. entre 1980 y 1990, inmigrantes legales la gran mayoría. De 1980 a 1990 se les dio visado a algo más de 2,2 millones, 630.000 de los cuales lo recibieron entre 1980 y 1988, mientras que en 1989 fueron admitidos legalmente 406.000 y en 1990 lo fueron otros 680.000. Estas cifras reflejan el programa de legalizaciones autorizado por la Ley de 1986 para la Reforma y el Control de la Inmigración. Pero no revelan el flujo real.

Como muchos mexicanos dicen, "no cruzamos nosotros la frontera, sino que la frontera nos cruzó a nosotros y ahora la traspasamos". En su óptica, la frontera es una abusiva imposición de 3220 kilómetros. No es, pues, sorprendente que de los 3,1 millones de personas indocumentadas que entraron en 1986, el 70 %, o sea, alrededor de 2,2 millones, fuesen mexicanos. Así también, algo más del 10 % del total de la población mexicana de EE.UU. lo forman personas indocumentadas. Pero ha de tenerse en cuenta que, ya en 1848, aquellos 25.000 mineros que desde Sonora fueron a trabajar a los yacimientos auríferos de California sólo un año antes no habrían sido extranjeros, sino que estarían en su propia tierra.

Las razones económicas de la migración son obvias: asimetría de la zona fronteriza, reiterada recesión económica mexicana y necesidad de mano de obra en EE.UU. De las varias crisis económicas de México en los años ochenta y noventa son clara muestra la gran cantidad de personas que pasan a EE.UU. en busca de empleo. Las periódicas devaluaciones del peso, las bajadas del precio del petróleo, la subida de las tasas de interés del dinero y la falta de crecimiento económico real son los factores que han contribuido y seguirán contribuyendo a que aumente la emigración.

Pero se dio siempre también un proceso de vuelta a México. Desde 1980 los retornos han decaído porque la crisis económica no ha remitido en México durante los últimos quince años y la economía estado-



5. RED TRANSNACIONAL DE OAXACA. Los mexicanos de Chiapas y Oaxaca suelen crear identidades transnacionales. Durante los seis o siete meses de su residencia en EE.UU., trabajan, asisten a los servicios de la iglesia, mandan a sus hijos a la escuela y pagan los impuestos. Se marchan luego al sur, para un período de dos o más meses, y allí suelen trabajar en alguna de las maquilladoras. Cuando vuelven a EE.UU. suelen seguir otra ruta, pasando por Mexicali, y allí viven en una casa alquilada o comprada, vecina siempre a la de algún pariente —por lo común muy próximo o consanguíneo—, y trabajan de nuevo en las maquilladoras, mandan a sus niños a la escuela local y participan de las diarias vicisitudes de la vida de frontera.





6. HOGAR INICIAL en las colonias de Texas, fotografiado en 1997 (*arriba*). Chozas (hogares humildes) de trabajadores agrícolas de California rural, en una foto del año 1998 (*abajo*).

unidense y su industria ligera se están reestructurando con miras a contratar servicios no estacionales, sino anuales.

Debemos a Leo R. Chávez una sugestiva explicación del fenómeno apoyada en diversos factores. Tienen éstos estrecha relación con el ciclo vital de los individuos que inmigran. Los jóvenes solteros lo hacen por razones muy distintas de las de los casados; las esposas y los hijos dejados atrás aducen otros motivos para ir a reunirse con sus maridos y padres. También son muy diferentes de todos los demás motivos y contrastan con ellos los de las mujeres con hijos.

Quien cuente con una red de contactos de trabajo establecidos por parientes que emigraron antes tendrá más facilidades y se sentirá más animado a emigrar. Tales redes sociales se autoperpetúan y sirven de estímulo a los movimientos migratorios, aun cuando las condiciones económicas no garanticen el éxito.

A veces, quienes no tienen hijos pueden incluso pedir el suyo a un hermano, o hacer que venga un sobrino quinceañero ofreciéndole la oportunidad de ir a la escuela a aprender inglés. Arreglos así son muy comunes a lo largo de la frontera. En parte, a esta peculiar clase de relaciones se debe la creación de "grupos de asentamientos familiares fronterizos" desde los que se cruza continuamente en ambos sentidos la raya entre México y EE.UU. para cerrar tratos. Es frecuente que una generación haya nacido en el lado estadounidense, la siguiente en el lado mexicano, y la tercera de nuevo en EE.UU. A este fenómeno lo he llamado yo el "juego generacional de la rayuela".

Pero hay otras motivaciones que Chávez ha clasificado como importantes para la inmigración indocumentada, entre ellas las de los "ganadores de sumas fijas", que hacen viajes al norte para poderse pagar una boda, ayudar a sus padres o liquidar una deuda. También pueden darse casos, como algunos investigados por mí, en los que se necesite agrandar la explotación agrícola o comprarse aperos de labranza o aparejos de pesca para asegurarse la subsistencia. Es bastante común que los pescadores mexicanos se aventuren hasta San Pedro o San Diego de California para hacer el máximo de capturas durante una estación y que después vuelvan con el fin de comprarse un motor fuera borda, una lancha o redes nuevas.

Suele hablarse también como dice Chávez del "sueño del inmigrante". Se imagina éste un país de oportunidades ilimitadas. Tan alta valoración anima a superar cualquier obstáculo. Optimismo que contrasta con la dura realidad de un trabajo servil y mal pagado. Sólo quienes hayan alcanzado una múltiple pericia ocupacional y sean capaces de adaptarse fácilmente al cambio de circunstancias podrán sacar alguna ventaja en un plazo corto.

Encontré en la californiana Riverside un músico mexicano que no se amilanó tras su primer despido como *disk jockey*. Supo sacar partido a su experiencia comprando a crédito en el mercado de segunda mano casetes y vídeos para revenderlos a una escogida clientela; con las ganancias que este cambalacheo le proporcionaba fue adquiriendo el instrumental básico de una orquesta y un buen equipo estereofónico; por fin, organizó una pequeña banda con la que tocaba en diversas fiestas y actos sociales, a la vez que volvía a ocuparse como *disk jockey* en una discoteca. Simultáneamente él y su esposa trabajaban para una compañía de limpieza a domicilio, y cada día, terminado el trabajo a sueldo, iban ambos y su hijo mayor, con el mismo equipo, a limpiar otras casas sin informar a nadie de lo que así se ganaban extra. De esta forma pudieron comprarse una casa, tener coche y educar a cinco hijos modestamente, pero con relativa independencia. Historias así llegadas a oídos de parientes, omitiendo la cara obscura de una vida de privaciones, dan alas a la fantasía.

Entre las mujeres el movimiento inicial hacia el norte lo estimula la muerte del esposo, el abandono por el marido y el sacar adelante a sus hijos. Pero no es raro que también las mujeres se unan a las redes laborales establecidas por sus parientes y formen "agrupaciones familiares" para aprovechar las ventajas de las guarderías infantiles y tener más ocasiones de empleo.

Las mujeres solteras, madres o no, muestran una innegable habilidad para emplearse. Desde embanastar naranjas en Riverside, hasta trabajar a destajo en lavanderías de Los Angeles, como doncellas de hotel en Tucson, limpiando hogares de la clase media, cuidando niños de las clases alta y media mexicana o anglosajona en San Antonio, las mexicanas indocumentadas se emplean sin dificultad.

Hay otras razones que también fuerzan a la inmigración. Se citan los conflictos y desavenencias familiares, el afán de aventura y la curiosidad del querer saber qué hay al otro lado de la frontera, por no hablar de las cuestiones de herencia y el que los hombres traten de desentenderse de las responsabilidades que subsiguen a los divorcios.

En los estados del centro y del sur de México, por la forma de repartirse las herencias, las fincas van siendo cada vez más pequeñas, hasta convertirse en minifundios que apenas dan para el sustento de una sola persona, no digamos ya de una familia, con lo que es frecuente que se llegue a las manos por cuestiones de lindes. Muchos hombres huyen a EE.UU. para librarse de la dinámica de las reyertas familiares.

La mayoría de los que emigraron hacia el norte durante la Revolución solían trabajar en grupos familiares. Pero la fuerza laboral contratada a comienzos del siglo XX para faenas agrícolas, el tendido del ferrocarril o la minería estaba formada por varones que, después, o regresaban a México por sus esposas y llevándolas consigo volvían al norte o se casaban con mexicanas ya residentes en EE.UU. Los varones solteros que emigraban para trabajar bajo contrato fueron mucho más numerosos en 1964, cuando, terminado el Programa "Bracero", no era sin embargo de esperar que se interrumpiera la oleada migratoria, dado que la agricultura estadounidense necesitaba siempre mano de obra.

Mas este cuadro variaba y se complicaba a menudo según fuese el tipo de recolección agrícola. El trabajar a destajo, por ejemplo en los cítricos, podía resultar más lucrativo para una familia si sus componentes participaban en todo el proceso: recoger la fruta, cargarla en vagonetas, seleccionarla y distribuirla para su reparto y comercialización.

Asimismo, el tipo de soltero emigrante difería algo según entrara por un sitio o por otro. Los que lo hacían por Texas solían unirse a las expediciones que familiares suyos mexicanos ya residentes emprendían hacia Minnesota y Wisconsin, siguiendo la corriente migratoria hacia el Medio Oeste. Otros se unían a familias que iban por la costa occidental hacia California para trabajar en la recolección de la fresa, los cítricos o la uva y, después, a los estados de Oregón y Washington para la cosecha de la manzana. Terminaban por quedarse.

Desde 1960 la inmigración recala sobre todo en zonas urbanas. En 1910, sólo el 5,7 % de la población mexicana vivía fuera de la región del Sudoeste; en 1960 había aumentado al 12,8 % y siguió aumentando con ligeras variantes. Pero el 87 % en 1970 prefirió vivir en la región; hubo una pequeña disminución al 83 % en 1980 y un nuevo remonte al 83,6 % en 1990. Fuera del Sudoeste, el estado preferido por los mexicanos durante los últimos 25 años ha sido Illinois, asentándose en Chicago.

De entre los cinco estados del Sudoeste, en 1990 California seguía teniendo la mayor concentración de mexicanos nativos y nacidos fuera, sumando en total el 45 % de la población estadounidense de origen mexicano; seguíanle Texas, con el 28 %, Arizona, con el 4,6 %, Nuevo México, con el 2,4 %, y Colorado, con el 2,1 %. Va después Illinois con el 4,6 %, la mayoría concentrados en áreas urbanas. En California, el 59 % de los mexicanos son estadounidenses nativos, mientras que el 41 % han nacido fuera de EE.UU.; en Texas, el 75 % nativos y el 25 % nacidos fuera; en Arizona, el 62 % nativos y el 38 % nacidos fuera; en Nuevo México, el 84 % nativos y el 16 % nacidos fuera; en Colorado, el 87 % nativos y el 13 % nacidos fuera.

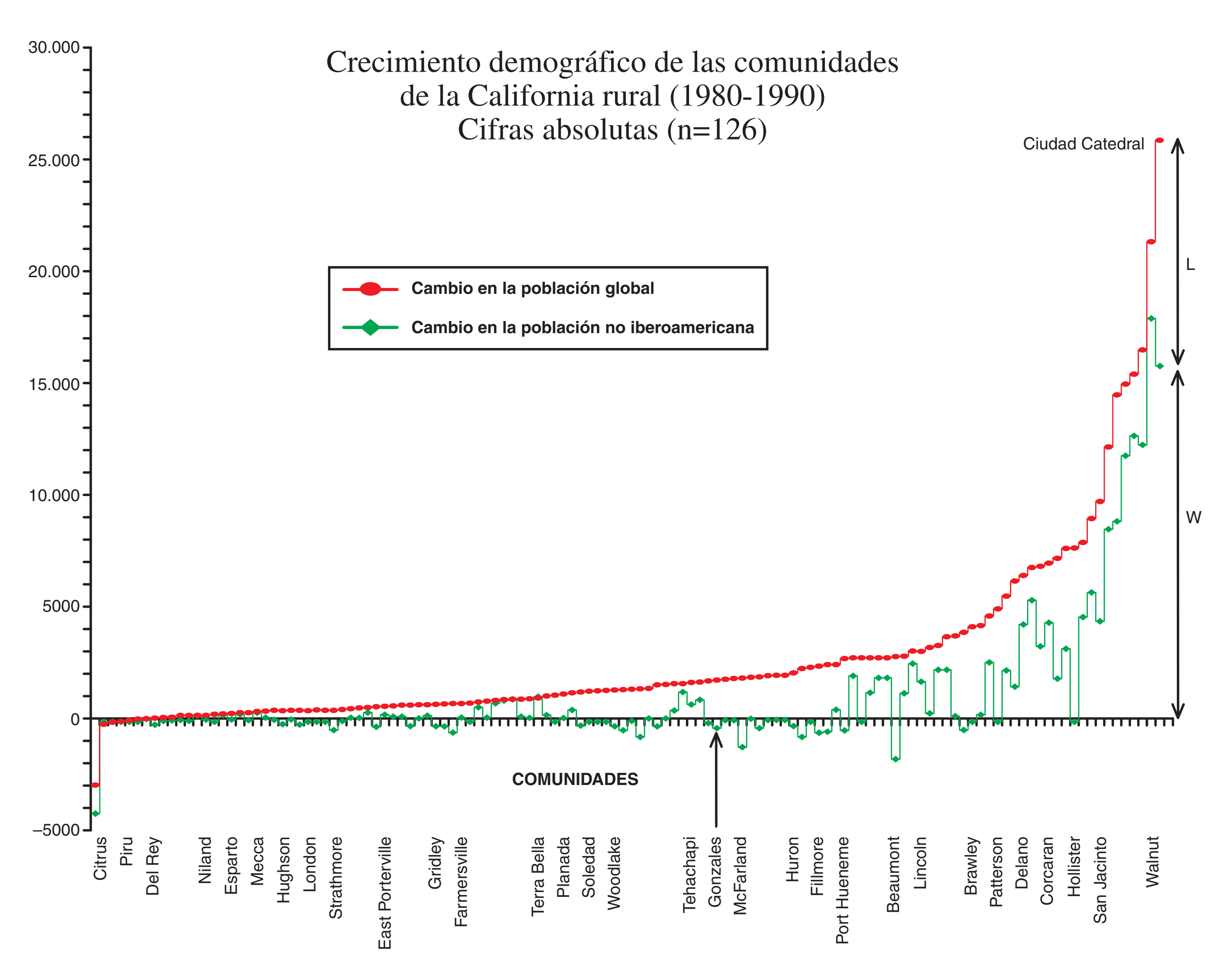
Muchos de los hispano-mexicanos de Colorado y de Nuevo México no se tienen a sí mismos por mexicanos sino por descendientes directos de los súbditos de la Corona de España que habitaron allí desde el siglo XVII. Una distinción harto bizantina. Desde el siglo XVII la mayoría de los colonos fueron labradores o pastores, o artesanos, menestrales y pequeños comerciantes nacidos todos ellos en México de padres hispanos o hispano-mexicanos, y gran parte del crecimiento demográfico de la zona neomexicana hasta el siglo XIX la formaron colonizadores que emigraban desde el sur, desde Nueva España.

Sin embargo, en el presente los mexicanos se integran sin dificultad en grupos laborales de muy diverso origen geográfico, pero la mayoría de ellos siguen considerándose muy vinculados entre sí. Es un fenómeno que se observa también entre los indígenas de Oaxaca y Chiapas, muchos de los cuales son grupos culturales que no hablan el español, como los mixtecas, los chatinos y otros.

Michael Kearney hace notar que esas personas, por ejemplo en River-



7. Instantánea tomada en 1998 de hogares de trabajadores agrícolas de la California rural.



8. EL CRECIMIENTO de la población rural de California mostró un claro ascenso entre 1980 y 1990, de acuerdo con un estudio llevado a cabo por Allensworth y Rochin en 1996, sobre una muestra de 126 comunidades californianas, que seleccionaron en atención a su base agrícola y a que en ellas, en 1980, un mínimo de por lo menos el 15 % fuesen "iberoamericanos" (de los que más del 90 % resultaron ser de origen mexicano).

side, suelen crear identidades transnacionales en las que, durante los seis o siete meses de su residencia en EE.UU., trabajan, asisten a los servicios de la iglesia, mandan a sus hijos a la escuela y pagan los impuestos. Se marchan luego al sur, a Tijuana, en la Baja California, para un período de dos o más meses, y allí suelen trabajar en las maquilladoras, viven en una casa comprada en la vecindad de algún pariente, envían a sus hijos a la escuela y participan en la vida de la comunidad, después de lo cual retornan a su punto de origen en Oaxaca o en Chiapas. Una vez ahí, se resitúan culturalmente participando en el sistema local de cargos y se cuidan tal vez de sus inversiones y rentas agrícolas, si han conservado tierras.

Un fenómeno que preocupa por su creciente difusión son las colonias pobres construidas sin permiso, en suelo no edificable, sin agua corriente, ni alcantarillado ni tendido eléctrico. Según las estimaciones más fiables, se han formado así nada menos que 1436 colonias, habitadas por unas 340.000 personas, de las que casi el 40 % han nacido fuera y el 60 % son nativos. Comenzando por los años 1950, pero acelerándose su aparición desde 1980, las colonias surgieron a causa sobre todo de las altas tasas de nacimientos y también por el gran auge de las maquilladoras en la frontera internacional y por la fuerte demanda de mano de obra en la agricultura de Texas y de California.

Tales colonias se concentran a lo largo de la frontera neomexicana y texana de los Estados Unidos. Sus moradores son económicamente modestísimos, con un promedio de ingresos entre los 7000 y los 11.000 dólares para familias de 5 o 6 personas, de bajísimo nivel de instrucción. Un simple vistazo a la demografía bastará para percatarse de lo que es una de esas colonias, la denominada "El Cenizo", en Texas. Compónenla 254 familias, de las que 220 son mexicanas. En cada familia hay un promedio de 5,4 personas. Cada vivienda está abarrotada, pues sus ocupantes superan el núcleo familiar. En 110 de las 193 habitaciones se cobijan más de 5 personas, y en una de cada 70 duermen más de 7. La mayoría de los 1312 habitantes son jóvenes, sólo un 10 % del total tienen más de 40 años, y más del 50 % edades inferiores a los 18.

En los últimos años, la comunidad ha mejorado bastante con la instalación de agua potable, alcantarillado y electricidad, y se ha creado un centro de asistencia social que proporciona servicios médicos, familiares y de búsqueda de empleo.

Ahora bien, sólo siete años después de estos logros, la población era ya tres veces más numerosa que la arriba citada, y sólo un 24 % de ella tenía estudios medios, un 70 % leía o escribía el inglés “malamente” o “nada en absoluto”, un 70 % estaban por debajo del nivel de pobreza, y los ingresos medios por familia eran algo menos de 7500 dólares. El desempleo era superior al 25 % de las personas de 25 o más años, siendo así que en el estado de Texas la media general del desempleo se cifraba en el 7,1 %. La prognosis más optimista es que la población irá aumentando anualmente entre el 7 y el 10 %.

La mayor integración de los años ochenta, requerida por los aún más intensos procesos globalizadores de la economía mundial, ha hecho que la emigración desde las zonas rural-agrícolas de México hacia la frontera del norte se vaya atenuando, en especial por las continuas aunque limitadas inversiones del Estado en las zonas campesinas.

La población de California aumenta a un ritmo de 1644 por día. Aunque se trata, en buena medida, de un crecimiento urbano, también es muy elevado en las comunidades rurales, formadas la mayoría de ellas por emigrantes mexicanos, nativos o nacidos fuera del país, aproximadamente en la misma proporción, entre el 60 y el 40 %, que se da en otras zonas. Gran parte de ese incremento se explica por la necesidad de mano de obra barata; para reestructurar las formas de producción agrícola; y pasar de las explotaciones familiares a las extensiones paraindustriales se precisan jornaleros. De forma concomitante se asiste a una salida de los residentes hacia otros trabajos mejor pagados; se les sustituye por quienes se conforman con ganar menos, la mayoría de los cuales son mexicanos, nativos o extranjeros, con lo que se está “mexicanizando” la California rural.

Aunque el aumento demográfico se debe sobre todo a la inmigración mexicana, no es ésta el factor determinante de la fuga de los anglosajones. De acuerdo con los resultados de un estudio de Allensworth y Rochin, en quince comunidades la población no mexicana aumentó más del 50 %, a la vez que creció también en el mismo porcentaje la población mexicana. En 45 comunidades las poblaciones anglosajona y mexicana aumentaron del 1 al 50 %, y 64 comunidades perdieron población anglosajona y experimentaron aumentos del 50 % de la población mexicana. No se trata de que los mexicanos reemplacen a los anglos, sino de que cuando éstos no disminuyen o allí donde aumentan, los mexicanos tienen un menor porcentaje de la población. Por tanto, el principal factor causante del cambio de componentes étnicos corresponde al ritmo variable de aumento de la población anglosajona.

La proporción de matrimonios mixtos varía según las regiones. La más baja se da en Texas y en Nuevo México; la más alta, en California. En conjunto, las tasas de matrimonios mixtos mexicanos son inferiores a las del total de EE.UU.: del 22,5 % al 29,5 %. Esas cifras apenas pueden compensar las elevadas tasas de inmigración, los nacimientos y la fuerte movilidad del conjunto de la población de clase obrera. Sin duda, la población de California va a seguir aumentando, y mucho, con mexicanos nacidos en el país o fuera de éste. Ninguna ley restrictiva de la inmigración será eficaz mientras las estructuras económicas y tecnológicas demanden mano de obra.

Un aspecto que se suele olvidar cuando se trata de los mexicanos del sudoeste de EE.UU. es el de que las relaciones históricas y los nexos sociales han sido durante mucho tiempo los mecanismos que han impulsado el cruce de la frontera. Para muchos mexicanos, en especial para los de los estados limítrofes del norte, pasar la frontera viene a ser como cruzar por una calle en su barrio, que ha cambiado de lugar de vez en cuando.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MEXICAN IMMIGRATION IN THE 1980'S AND BEYOND: IMPLICATIONS FOR CHICANOS. Leo Chávez y Rebeca G. Martínez, en *Chicanos: The Contemporary Era*. Coordinado por Isidoro Ortíz y David Maciel. University of Arizona, 1995.

RECONCEPTUALIZING THE PEASANTRY, Michael Kearney. Westview Press, 1996.

BORDER VISIONS: THE CULTURES OF MEXICANS OF THE SOUTHWEST UNITED STATES. Carlos G. Vélez Ibáñez. University of Arizona Press, 1996.

MEXICANS OF THE SOUTHWEST UNITED STATES. Carlos G. Vélez Ibáñez en *Encyclopedia of American Immigrant Cultures*. Macmillan Library Reference, 1997.



Los cantores diafónicos de Tuva

Sometiendo a prueba los límites de su capacidad vocal, los cantores diplofónicos crean sonidos inigualables. Mantienen dos notas a la vez o sintonizan con una cascada

Theodore C. Levin y Michael E. Edgerton

Desde la cima de uno de los escarpes rocosos que cruzan las estepas de la Siberia meridional y los bosques de la taiga de Tuva, la primera impresión que recibe el viajero es la de un silencio imperturbable, tan vasto como la propia región. El oído se habitúa poco a poco a la quietud ambiente, sin un alma humana en derredor. El silencio se funde en una sutil sinfonía de zumbidos, balidos, burbujeos, gorjeos y silbidos: palabras onomatopéyicas con las que designamos los sonidos de insectos, diversos mamíferos, agua, pájaros y viento. Esta polifonía nos llega parsimoniosa; colores y ritmos lo mismo se atenúan que reverberan a su paso por los contornos cambiantes de la región.

Para los pastores seminómadas que viven en Tuva, el panorama sonoro inspira un tipo de música que se funde con el murmullo del entorno. Rodeada de montañas, lejos de las grandes rutas comerciales, rural, la región de Tuva es el valle Olduvai de la música, una reliquia viva de un mundo protomusical donde los sonidos naturales se funden con los producidos por el hombre.

Entre las diversas maneras que los pastores utilizan para representar y comunicarse con su ambiente sonoro, destaca una en particular, una excepcional técnica de canto en la que el intérprete emite simultáneamente dos notas bien definidas. Una de las notas es grave, un fundamental sostenido similar a un bordón de la gaita. La segunda nota es una serie de armónicos de tipo flauta, que resuenan muy por encima del bordón y pueden estilizarse para que imiten el gorjeo de un pájaro, los ritmos sincopados de un torrente de montaña o el galope de un caballo.

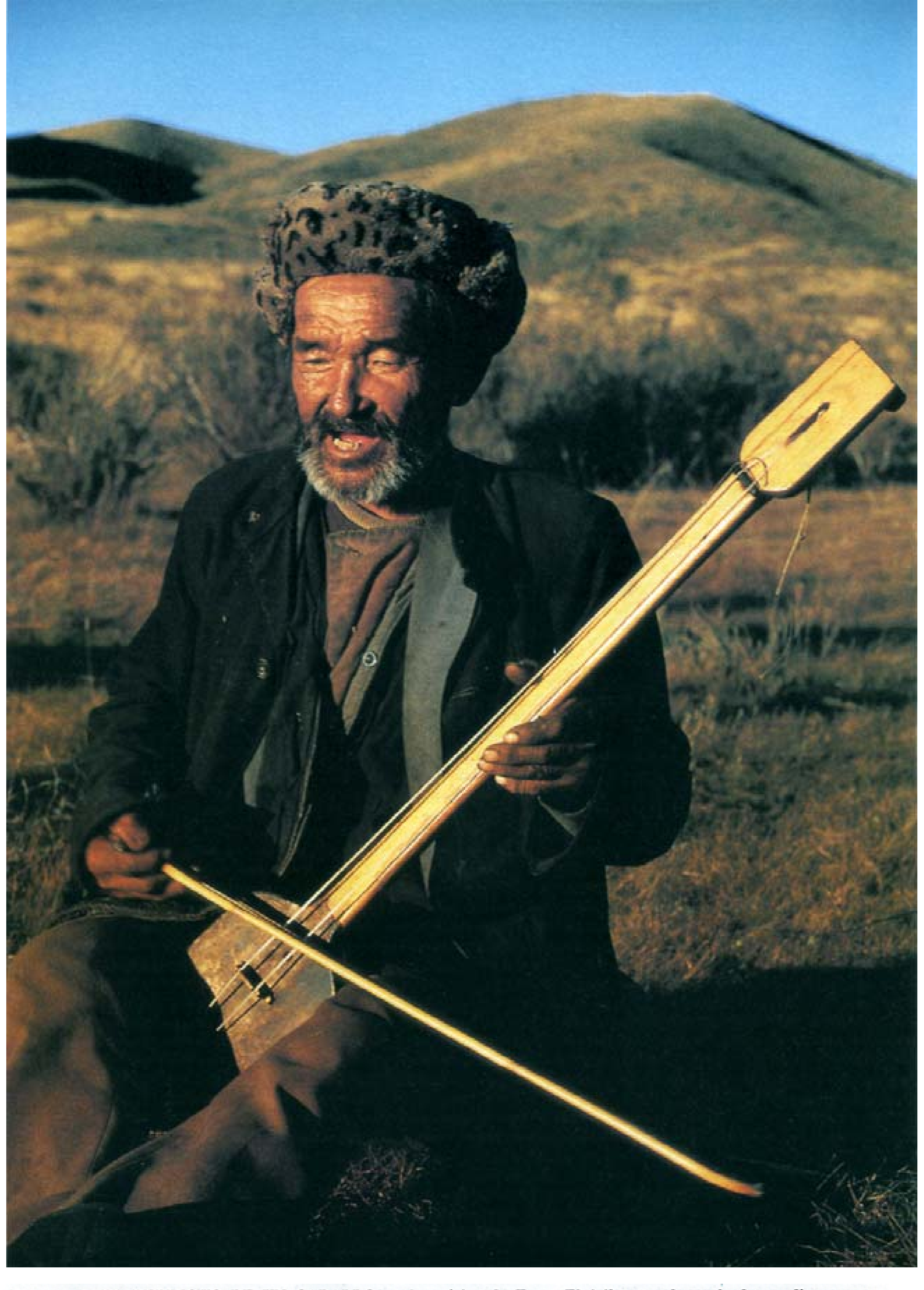
El término general que utilizan los idiomas del lugar para designar esta diafonía (o diplofonía) es *khöömei* o *khoomii*, que en mongol designa la garganta. Algunos compositores occidentales han conseguido también dominar este tipo de canto. Lo denominan canto armónico. Este tipo de música, peculiar de una cultura expresiva, es, a la vez, manipulación de la acústica de la voz humana. Intentar comprender ambos aspectos ha sido un reto para los musicólogos y los dos autores —un etnógrafo musical (Levin) y un compositor interesado en ampliar las técnicas vocales (Edgerton)— tuvimos que introducirnos cada uno en el terreno del otro.

Imitación sonora

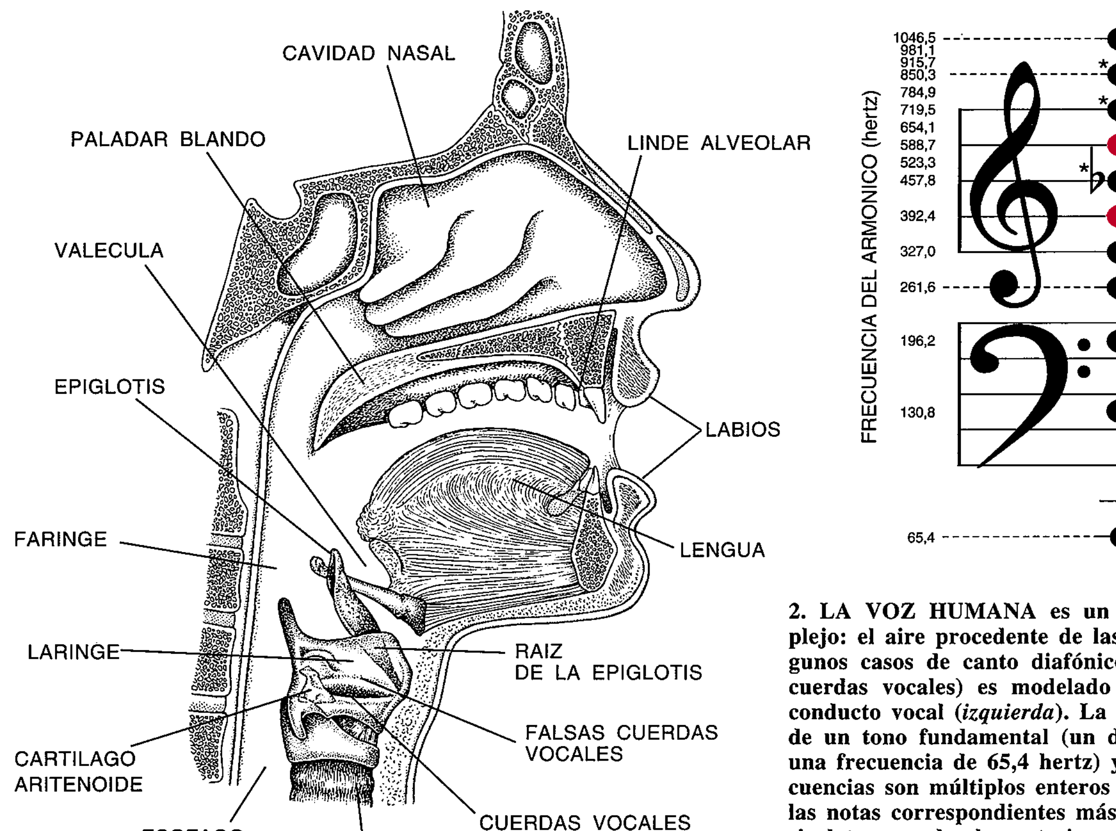
Cuenta la leyenda tuvana sobre los orígenes del canto diafónico que la humanidad lo aprendió hace mucho tiempo. Se dice que los primeros buscaban imitar sonidos naturales cuyos timbres abundaran en armónicos, como el burbujeo del agua o el silbido del viento. Pese a la oscuridad que envuelve a los comienzos del canto diafónico, los cierto es que la música pastoril de Tuva guarda una íntima vinculación con una antigua tradición animista, según la cual objetos y fenómenos naturales tenían alma o estaban habitados por espíritus.

De acuerdo con el animismo de Tuva, el carácter mágico de las montañas y los ríos se manifiesta no sólo por su forma física y su situación, sino también por los sonidos que produce o puede producir con intervención humana. De ese modo el eco de un acantilado puede adquirir un significado mágico. Se afirma también que los animales expresan su poder espiritual a través de los sonidos. Al imitarlos, el hombre puede hacer suyos tales poderes.

Entre los pastores, imitar los sonidos ambientales es tan natural como hablar. El canto diafónico no se en-



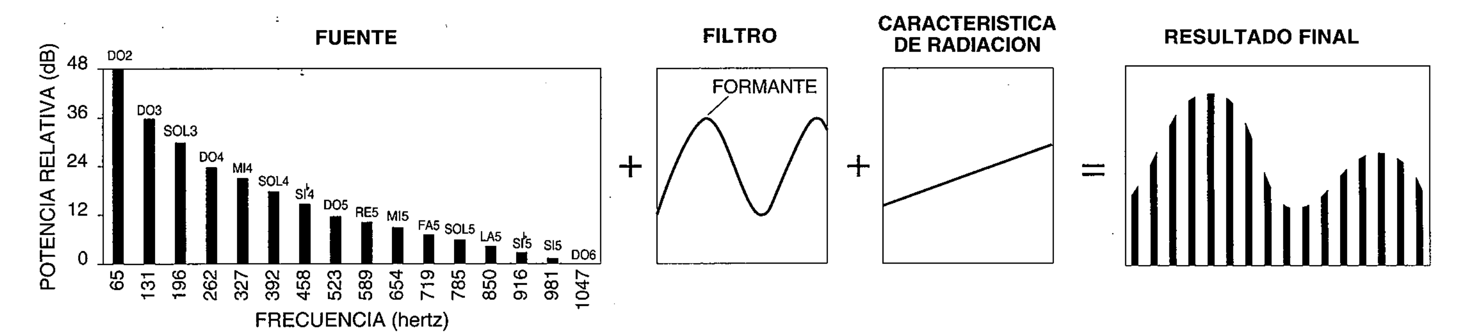
1. EL RELINCHO DE UN CABALLO en la música de Tuva. El *igil* —tocado en la fotografía por Andrei Chuldum-ool en la estepa de Siberia meridional— es un violín vertical de dos cuerdas fabricado de cuero, crin y tripa de caballo; se utiliza para imitar los sonidos de los equinos. La mímesis sonora, base cultural de la música de Tuva, alcanza su punto culminante en el canto diafónico.



2. LA VOZ HUMANA es un instrumento musical complejo: el aire procedente de las cuerdas vocales (y, en algunos casos de canto diafónico, de las denominas falsas cuerdas vocales) es modelado por el resto del tracto o conducto vocal (*izquierda*). La vibración resultante consta de un tono fundamental (un do grave, por ejemplo, con una frecuencia de 65,4 hertz) y sus armónicos, cuyas frecuencias son múltiplos enteros (*arriba*). Aquí se muestran las notas correspondientes más cercanas en la escala musical temperada; los asteriscos indican los armónicos sin una correspondencia clara con la escala temperada.

seña en la escuela, sino que se aprende por imitación, igual que un idioma. Aunque son muchos los pastores que cantan en diplofonía, no todos poseen un sentido musical. Ante el tabú de que provoca en las mujeres la esterilidad, éstas no acostumbraban cantar. Pero el prejuicio va perdiendo fuerza y las jóvenes también comienzan a aprender la técnica. La popularidad del canto diafónico entre los pastores de Tuva parece haber surgido a partir de una convergencia entre cultura y geografía: por un lado, la sensibilidad animista a las sutilezas del sonido y a su timbre en particular; por otro, la capacidad que tienen los armónicos reforzados para propagarse por la llanura esteparia. Veinte años atrás, los conciertos escaseaban, pues los de Tuva consideraban su música algo muy local como para invertir en ella. La situación ha cambiado. Hay grupos profesionales, que han conseguido fama, y los mejores cantantes se han convertido en símbolo de identidad cultural nacional.

La práctica más virtuosística del canto se concentra en Tuva (o Tyva), una república autónoma de Rusia y fronteriza con Mongolia, así como en la región del Altai que la rodea, en particular la parte occidental de Mongolia. Pero los armónicos reforzados con la voz se oyen también en otras zonas de Asia Central. Los músicos bashkires, un pueblo de los montes Urales que habla turco, cantan melodías con armónicos reforzados en estilo *uzliau*. Cantores épicos de Uzbekistán, Karakalpakstán y Kazakhstán introducen retazos de armónicos reforzados en la poesía hablada; ciertas formas del canto budista tibetano se caracterizan por un armónico reforzado y sostenido sobre una nota fundamental. Fuera de



3. EL MODELO FUENTE-FILTRO aborda la voz cual si constara de componentes diferenciados. La fuente sonora —las cuerdas vocales— produce una mezcla de armónicos que son más fuertes en las frecuencias graves que en las agudas. El filtro —el tracto vocal— transmite algunos armónicos (que se alinean con sus formantes) con mayor facilidad que otros. La radiación característica del aire exterior se convierte en un segundo filtro.

Creando formantes

Si bien las cuerdas vocales pueden producir una variedad impresionante de sonidos, corresponde al tracto vocal modelar los sonidos en bruto para formar lenguaje y música. El conducto de la voz impone un modelo condicionante al conjunto de sonidos creados por las cuerdas vocales, seleccionando la combinación de notas que coincide con las frecuencias resonantes naturales del aire dentro del tracto o conducto. Cuando la gente habla o canta, lo que hace es subir o bajar las frecuencias resonantes —frecuencias formantes— moviendo la lengua, labios y otros órganos.

Estos movimientos se perciben generalmente como variaciones en la articulación de vocales. La frecuencia del primer formante, F_1, está en relación inversa con la altura de la lengua (F_1 baja cuando la lengua sube). La frecuencia del segundo formante, F_2, está ligada al avance de la lengua (F_2 sube cuando la lengua se mueve hacia adelante). En teoría, el tracto vocal puede generar un número infinito de formantes, pero la combinación de los dos o tres primeros da razón de la mayoría de las diferencias entre las vocales.

Para entender por qué las frecuencias de los formantes se desplazan, imaginemos que el tracto vocal es un tubo cerrado en un extremo (las cuerdas vocales) y abierto en el otro (los labios). Imaginemos entonces que el tubo presenta una sección constante en toda su longitud, de forma que las frecuencias resonantes son establecidas por la longitud del tubo. Para un tubo de 17,5 centímetros de longitud —aproximadamente la longitud del conducto de voz de un varón adulto— F_1 tiene su pico a los 500 hertz, F_2 a 1500 hertz, F_3 a 2500 hertz, y así sucesivamente.

Cada resonancia representa una onda estacionaria en el interior del tubo. En otras palabras, las oscilaciones de la presión de aire (que transportan el sonido) adoptan una estructura definida; lo mismo sucede con el movimiento en vaivén de las moléculas que se produce por la variación de la presión a lo largo del tubo. En ciertas posiciones, los llamados nodos de presión, la presión permanece constante y las moléculas deben recorrer una distancia mayor. En otras posiciones, los antinodos de presión, la presión fluctúa alrededor de su valor máximo y las moléculas no se mueven (el movimiento térmico aleatorio se puede despreciar porque no influye en el movimiento general de la onda). Como el extremo cerrado del tubo impide que las moléculas se muevan, éste tiene que ser necesariamente un antinodo de presión. El extremo abierto al aire exterior debe ser un nodo de presión. Cada formante más agudo añade otro par de nodo y antinodo (*abajo, izquierda*).

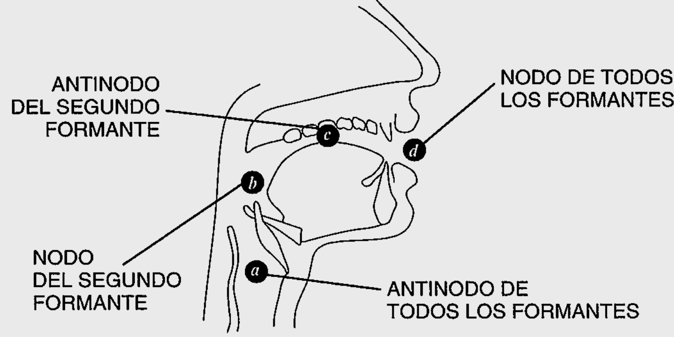
Supongamos ahora que el tubo se comprime; sucede así cuando la lengua reduce el tracto vocal. Los nodos y los antinodos todavía se alternan, pero su frecuencia varía en función de la compresión del tubo. Una reducción próxima a un nodo de presión rebaja la frecuencia del formante, mientras que la eleva una reducción cercana a un antinodo de presión. La dilatación de la sección ejerce el efecto contrario. Estas reglas empíricas fueron avanzadas por Lord Rayleigh hace un siglo.

En un nodo, la reducción de la sección del tubo fuerza a las moléculas a que pasen a través de una abertura más estrecha. Suponiendo que la diferencia de presión que las impulsa sigue siendo aproximadamente la misma, el aire necesita más tiempo para completar su movimiento. La onda tiene que reducir la velocidad, es decir, debe disminuir la frecuencia.

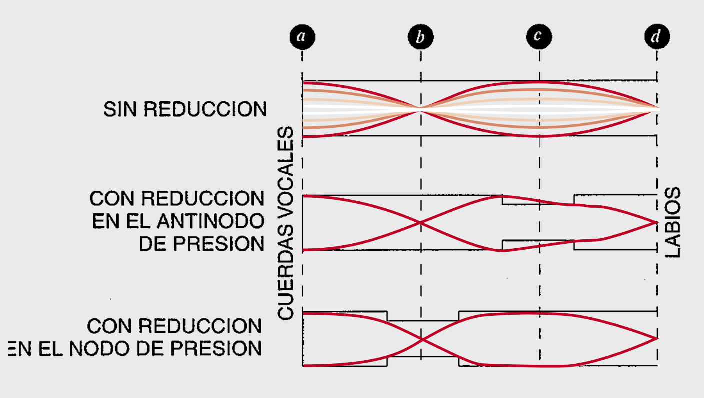
En el antinodo de presión, las moléculas no se mueven; sin embargo, su densidad varía a medida que las fluctuaciones de presión arrastran a las moléculas de su alrededor hacia el antinodo y las alejan de él, de forma alternante. Puesto que la reducción de la sección disminuye el volumen del tubo cerca del antinodo, la adición de un número determinado de moléculas incrementa la densidad y, por ende, la presión ejercida. El sistema se vuelve más rígido. Responde con mayor rapidez, haciendo que la frecuencia de la onda aumente. Una explicación rigurosa, basada en la teoría de perturbaciones, muestra la nueva forma que deberá adoptar la onda estacionaria (*abajo*).

Los cantantes diafónicos aplican estos principios instintivamente. Cuando aprietan la base de la lengua contra la parte posterior de la garganta, donde el segundo formante tiene un nodo de presión, reducen la frecuencia de este formante. En el estilo *sygyt* de Tuva, los cantantes empujan hacia arriba la parte central de la lengua para restringir el antinodo del segundo formante, aumentando así su frecuencia. —*George Musser*

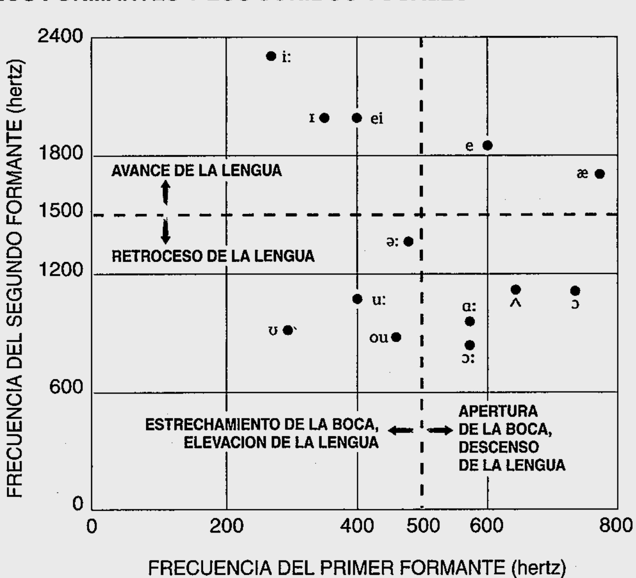
POSICION DE LOS NODOS Y LOS ANTINODOS EN EL TRACTO VOCAL



REPRESENTACION DE LAS ONDAS ESTACIONARIAS DEL SEGUNDO FORMANTE



RELACION ENTRE LA POSICION DE LA LENGUA, LOS FORMANTES Y LOS SONIDOS VOCALES



Asia, el uso de armónicos vocales en la música tradicional, aunque excepcional, no constituye ningún fenómeno desconocido. Aparece, por ejemplo, en el canto de las mujeres xhosa de Africa del Sur y, como caso muy inusual de improvisación musical, en las canciones texanas de Arthur Miles, quien sustituía el canto con armónicos por el típico yodel, en los años veinte.

Hace unos diez años, cuando la música de Tuva y Mongolia empezó a popularizarse en Occidente, no se conocía bien el mecanismo en cuya virtud los cantantes reforzaban los armónicos y las propiedades acústicas de los sonidos emitidos. Comenzaremos a entender mejor el proceso si nos servimos de la ayuda del modelo de la fuente-filtro, una explicación habitual de la voz. La fuente —las cuerdas vocales— produce una energía sonora bruta que modela el filtro —la faringe— para formar vocales, consonantes y notas musicales.

Adicción a los armónicos

El sonido es una onda cuya propagación modifica de un instante a otro la presión y otras variables relacionadas (como la posición de las moléculas en un medio sólido o líquido). En el habla y el canto, la onda se pone en movimiento cuando las cuerdas vocales perturban el aire que entra o sale de los pulmones. Las cuerdas vocales se abren y se cierran de forma periódica, haciendo que la presión de aire oscile con una frecuencia fundamental, o nota. Por no ser sinusoidal esta vibración, se genera una mezcla de sonidos puros, o armónicos, por encima de la nota fundamental. Los armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, el fundamental más grave en el repertorio de ópera es un *do* con una frecuencia igual a unos 65,4 hertz; sus armónicos están a los 130,8 hertz, 196,2 hertz y así sucesivamente. La potencia de los armónicos disminuye a medida que la frecuencia aumenta, de modo que la intensidad decae en 12 decibelios (unas 16 veces, en términos de energía sonora) con cada octava superior (al doblar la frecuencia).

El segundo componente del modelo fuente-filtro, el conducto de la voz, es un tubo por donde se propaga el sonido. El aire del interior de este tracto no es sólo un medio pasivo de traslación del sonido al exterior, sino que presenta también sus propias propiedades acústicas; en particular, la tendencia natural a resonar a ciertas frecuencias. A esas resonancias se las denomina formantes. Igual que el silbido que se produce cuando se sopla sobre la boca de un vaso, las resonancias entran en movimiento por la vibración de las cuerdas vocales. Amplifican o atenúan el sonido de las cuerdas vocales en notas muy definidas, transformando un soplido monótono en un grupo de notas reconocible.

El esculpido del sonido no acaba cuando sale de la boca. Conforme avanza, la onda se esparce por una gran área, pone en movimiento el aire a su alrededor y pierde energía. Con este filtro externo, o característica de radiación, las frecuencias graves se atenúan más que las agudas. La combinación de fuente, filtro y característica de radiación produce un sonido cuyos armónicos se atenúan a un ritmo de 6 decibelios (dB) por octava, con excepción de los formantes, los picos alrededor de ciertas frecuencias.

En el habla y el canto normales, la energía se concentra en la frecuencia fundamental y los armónicos se perciben como componentes del timbre —la calidad que distingue al complejo sonido del violín de los sonidos más puros de una flauta— y no como notas diferentes. En el canto diafónico, sin embargo, un armónico tiene tanta fuerza, que se percibe como una nota definida y silbante. Armónicos que, a menudo, se perciben como si fueran incorpóreos. ¿Son producto de una resonancia en el conducto de la voz, emergen en el espacio físico que le rodea o son fruto de la imaginación del oyente? Investigaciones recientes han puesto en claro que los armónicos reforzados vocalmente no constituyen ningún artificio de percepción, sino que tienen un origen físico.

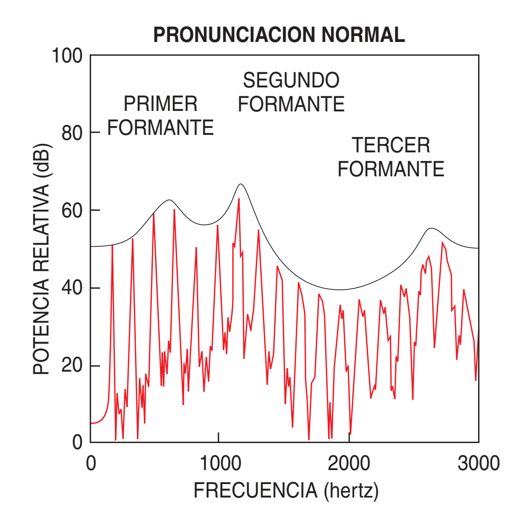
Realimentación biológica

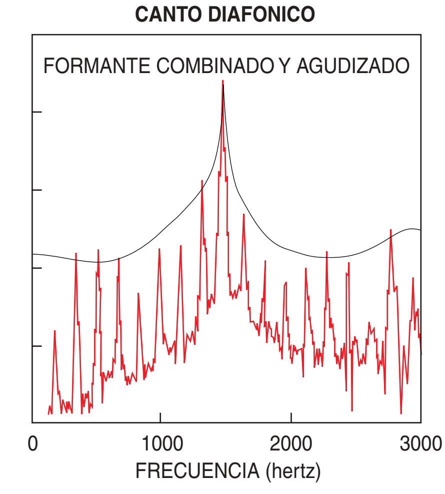
Queda mucho por conocer sobre el mecanismo de refuerzo. Con todo, distinguimos tres componentes, relacionados entre sí: la afinación de un armónico en medio de un formante muy estrecho y con un pico muy alto; la prolongación de la fase final del ciclo de apertura y cierre de las cuerdas vocales, y el estrechamiento del campo de frecuencias en las que el formante afecta a los armónicos. Cada proceso de éstos representa un drástico incremento del acoplamiento entre la fuente y el filtro. Pese a lo que se dice, los procesos no están relacionados con ningún rasgo fisiológico peculiar de los turcomongoles. Si se empeña, cualquiera puede aprender el canto diafónico.

Para afinar un armónico, el cantante ajusta la frecuencia del fundamental del soplido producido por las cuerdas vocales para sintonizar el armónico con un formante. Se trata del equivalente sonoro al abrir o cerrar una escalera para que uno de sus peldaños más altos se adapte a una cierta altura. El análisis acústico ha confirmado la precisión de estas afinaciones comparando dos armónicos distintos, el primero afinado con el centro del pico del formante y el segundo ligeramente desafinado, observándose que el primero es mucho más fuerte. Los cantantes consiguen esta afinación gracias a una realimentación biológica: suben o bajan la nota fundamental hasta que perciben que el armónico deseado resuena a la máxima amplitud.

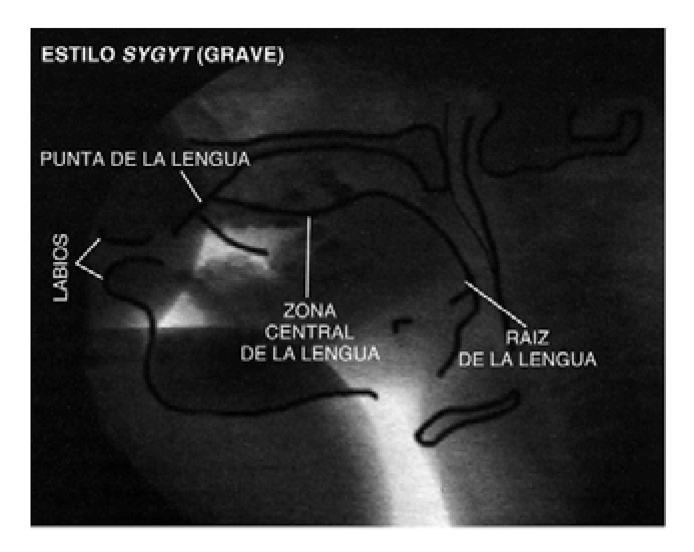
Los cantantes diafónicos no sólo modifican la frecuencia con la que se abren y se cierran las cuerdas vocales, sino también la forma en que lo hacen. Cada ciclo se inicia con las cuerdas vocales y la glotis cerradas; la glotis ocupa el espacio entre las cuerdas. Al expulsar aire de los pulmones, la presión aumenta y fuerza la separación de las cuerdas vocales hasta que se abre la glotis. Las fuerzas elásticas y aerodinámicas instan el cierre de esos espacios, remitiendo un golpe de aire al conducto de la voz. Los electrogramas de la glotis, que utilizan transductores situados en el cuello para seguir el ciclo, muestran que los cantores diafónicos mantienen abiertas las cuerdas vocales durante un período corto del ciclo y, cerradas, buena parte del tiempo. Cuanto más brusco sea el cierre, mayor será la energía de los armónicos agudos. El alargamiento del período de cierre ayuda a mantener la resonancia en el conducto de la voz porque se reducen las pérdidas de sonido en la base de la tráquea. Ambos efectos dan lugar

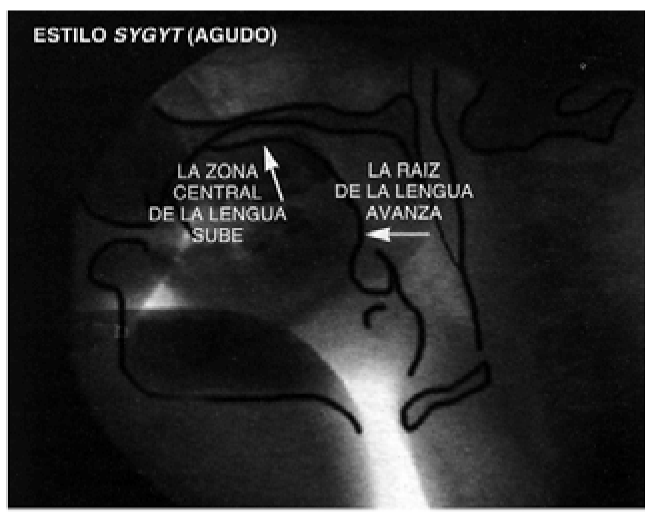
THEODORE C. LEVIN y MICHAEL E. EDGERTON empezaron a colaborar el año pasado cuando se les sugirió la redacción conjunta de este artículo. Levin, que ha realizado trabajos musicales en Asia Central desde 1977, enseña en el Colegio Darmouth. Edgerton es compositor, ha recorrido el mundo entero como intérprete y ha dirigido grupos vocales en los EE.UU. y Corea.

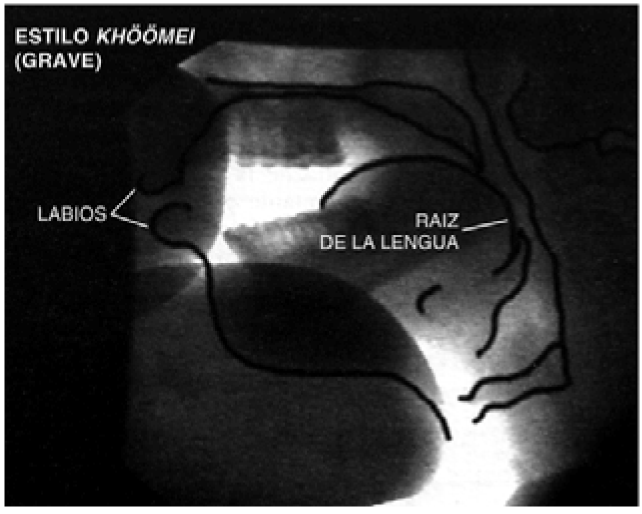


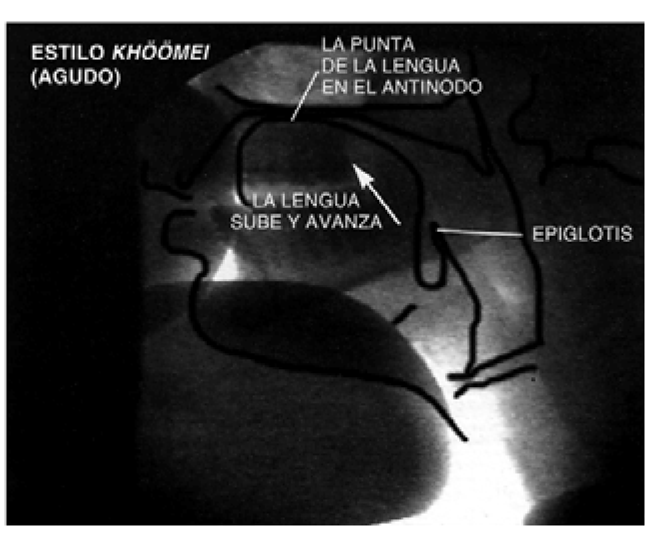


4. ESPECTROS SONOROS que muestran las diferencias entre la pronunciación normal, en inglés, de la vocal en "hot" (*izquierda*) y el canto diafónico (*derecha*). En ambos casos la energía se concentra en frecuencias bien definidas: los armónicos producidos por las cuerdas vocales (*rojo*). Los armónicos ganan en potencia cuando se alinean con las frecuencias de los formantes del conducto vocal (*negro*).









5. PLACAS DE RAYOS X que muestran a los cantantes diafónicos en acción. En el estilo *sygyt* de Tuva (*imágenes superiores*), los cantantes mantienen la punta de la lengua detrás de los dientes superiores, cerca del linde alveolar. Para pasar de los armónicos graves (*arriba, izquierda*) a los armónicos agudos (*arriba, derecha*), suben la parte central de la lengua y mueven la raíz de la lengua hacia adelante. En el estilo *khöömei*, la nota sube conforme la lengua se proyecta desde abajo y atrás (*abajo, derecha*) hacia arriba y delante (*abajo, derecha*).

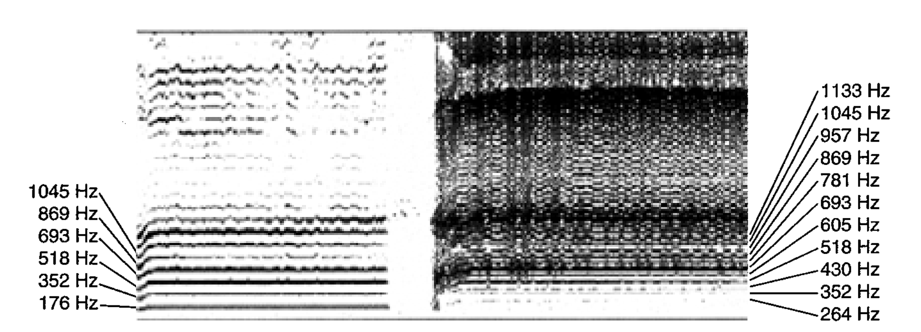


6. *ARTY-SAYIR* ("la otra ribera del lecho seco del río") es una melodía interpretada por el cantante diafónico Vasili Chazir. Los números indican el armónico correspondiente al fundamental, transcrito en este caso como un do grave sostenido.

a una reducción más gradual del espectro de frecuencias, lo que acentúa todavía más los armónicos deseados.

El tercer componente del aislamiento armónico es el repertorio de técnicas que utilizan los cantantes diafónicos para incrementar la amplificación y la selectividad aportadas por el conducto de la voz. Mediante la refinación de las características resonantes —empleadas para articular vocales—, los cantantes reubican, destacan y refuerzan los formantes. Con ello se da vigor a los armónicos incluidos en el estrecho pico del formante, a la vez que se atenúan los armónicos que se hallan fuera de este pico angosto. Así, un solo sobretono puede proyectarse por encima del resto. Los cantantes adelantan la mandíbula y realzan, estrechan y redondean sus labios. Estas contorsiones reducen las pérdidas de energía y realimentan las resonancias a la vibración de las cuerdas vocales, incrementando el refuerzo del pico del resonante.

En un estudio realizado con cantantes con armónicos de Tuva y cantantes de Occidente en el hospital clínico de la Universidad de Wisconsin, trabajo subvencionado por el Centro Nacional para la Voz y el Habla, se utilizaron la videofluoroscopia (imágenes en rayos X de objetos en movimiento) y la nasoendoscopia (visualización de las cuerdas vocales mediante una minicámara); se confirmó que los ejecutantes manipulan sus conductos vocales para desplazar la frecuencia del formante y alinearla con el armónico. Las melodías se consiguen reforzando sucesivamente los distintos armónicos. Los nueve músicos utilizados en el estudio han revelado por lo menos cuatro maneras claramente definidas para lograr este desplazamiento, aunque podría haber más.



7. EL DOBLE DE NOTAS están a disposición de un ejecutante cuando cambia del canto normal (*izquierda*) al estilo *kargyraa* del canto diafónico (*derecha*). Las cuerdas vocales siguen entonando un armónico fundamental, una nota fa cercana a los 176 hertz, mientras que el cantante hace entrar en acción simultáneamente a las cuerdas vocales falsas, produciendo un fa grave a la mitad de la frecuencia.

En el primer método, la punta de la lengua permanece detrás de los dientes superiores, mientras que su parte central se eleva para afinar sucesivamente los armónicos agudos. Los cantantes afinan el formante abriendo ligeramente los labios de forma periódica. El estilo de música que se produce por este medio recibe el nombre de *sygyt* ("silbido") en la lengua de Tuva.

En el segundo, los cantantes mueven la lengua hacia adelante, un hecho que en el lenguaje normal transforma el sonido vocálico inglés */o/* (de "hoe") en la */i/* larga (de "heed") El formante inferior baja; el segundo sube. Con un control preciso de la separación entre los formantes se afinan con armónicos distintos, reforzando hasta dos notas a la vez, como sucede a veces en el estilo *khöömei*.

El tercer sistema comporta movimientos, no en la cavidad bucal, sino en la garganta. Los cantantes sitúan la base de la lengua cerca de la parte posterior de la garganta para generar los armónicos graves. Para los armónicos medios y agudos se mueve la base de la lengua hacia adelante hasta que aparece un intersticio en la valécula: espacio entre la parte posterior de la lengua y la epiglotis (una aleta de cartílago que impide que la comida pase a los pulmones). Los armónicos más agudos se generan moviendo la epiglotis hacia adelante y cerrando la valécula.

En el cuarto método, los cantantes abren la boca con incrementos muy precisos. Desde el punto de vista acústico, eso supone recortar el conducto de la voz y aumentar la frecuencia del primer formante. El armónico superior susceptible de refuerzo está limitado básicamente por las pérdidas por radiación, que aumentan a medida que se abre la boca. Dependiendo de la nota del fundamental, el cantante puede llegar a aislar hasta el armónico duodécimo. Los cantantes de Tuva combinan esta técnica con una segunda fuente vocal para crear el estilo *kargyraa*, en el cual se pueden llegar a reforzar armónicos tan extremadamente agudos como el 43.

A dos voces

Esta fuente de sonido adicional es otro aspecto fascinante del canto diafónico. Los cantantes utilizan órganos distintos de las cuerdas vocales para crear un segundo sonido en bruto, una nota grave que parece im-

posible emitir. Muchos de estos órganos se producen a través del conducto de voz. El estilo *kargyraa* utiliza unas estructuras flexibles situadas encima de las cuerdas vocales: las denominadas cuerdas vocales falsas (tendones ubicados sobre cuerdas vocales genuinas, capaces también de obstruir el flujo de aire); los cartílagos aritenoides situados detrás de la garganta que, girando simultáneamente y en vaivén, ayudan a controlar la formación de la voz; los tejidos ariepiglóticos (unos tejidos que conectan las aritenoides y la epiglotis), y la base de la epiglotis. Una técnica distinta, que produce un sonido similar, aunque no entra en el estilo *kargyraa*, combina una nota glotal normal con una frecuencia grave, una vibración conocida por fritura vocal.

El estilo *kargyraa* se parece a la salmodia de los budistas del Tíbet, afinidad que les sirve a los investigadores para bautizarlo con la expresión "modo salmodia". Este sonido asume por lo general —pero no siempre— una relación de frecuencias 2:1, con un cierre superglotal alternando con el cierre respectivo de cuerda vocal. Una nota fundamental típica sería el do a 130,8 hertz, mientras que las falsas cuerdas vocales vibran una octava grave a 65,4 hertz. El análisis espectral muestra que, cuando uno de los cantantes cambia al modo salmodia, el número de componentes de frecuencia se dobla, demostrando que la segunda fuente sonora es periódica y su frecuencia es la mitad. El modo salmodia también afecta las características resonantes del conducto de la voz. Como la utilización de las falsas cuerdas vocales reduce el tracto vocal cerca de un centímetro, las frecuencias de los formantes se desplazan hacia arriba o hacia abajo según el lugar de la contracción sobre el formante seleccionado.

Habida cuenta del carácter absorbente de estas técnicas vocales, el interés de los cantantes de Tuva por la diafonía se concentra en el expresivo mundo sonoro que descubre. Igual que en cualquier otra forma cultural, la música plasma las preferencias individuales y sociales, así como ciertas habilidades físicas. Por ejemplo, en la escala de siete notas entre el sexto y el duodécimo armónico —gama empleada por los cantantes de Tuva y Mongolia— los intérpretes evitan explícitamente el séptimo y el undécimo armónico, porque la sintaxis musical local favorece las melodías pentatónicas (de cinco tonos).



8. LOS CHAMANES de Tuva manejan diversos instrumentos musicales para la curación espiritual. El animismo ha dado su forma a la música de Tuva y ha contribuido a mantener el canto diafónico como una tradición viva.

Otra preferencia cultural son las pausas alargadas entre respiraciones del canto diafónico, que llegan a durar hasta 30 segundos. Para un oyente occidental estas pausas se alargan en exceso y reducen la fluidez de la sucesión de frases melódicas. Pero los músicos de Tuva no conciben estas frases sujetas a una pieza musical; cada frase transmite una imagen sonora independiente. Las pausas largas proporcionan a los cantantes el tiempo necesario para poder escuchar los sonidos ambientales y formular así una respuesta, además de permitirles respirar.

Las variaciones de estilo reflejan la idea estética central de la mímesis sonora. El canto diafónico es uno de los medios utilizado por los pastores-cazadores para establecer contacto con su entorno acústico natural. La gente de Tuva utiliza una gama de vocalizaciones para imitar los reclamos y los gritos de los animales salvajes y domésticos. Tocan el *ediski*, suerte de caramillo que imita al ciervo almizclero hembra, el *khirlee*, delgada pieza de madera que se hace girar como un rotor para emular el sonido del viento, el *amyrga*, cuerno de caza con el que se evoca el reclamo de apareamiento de un ciervo macho, y el *chadagan*, cítara que canta con el viento cuando los pastores de Tuva lo colocan en los tejados de sus yurtas. Los que utilizan el *khomus,* o guimbarda, no sólo recrean sonidos naturales como el movimiento del agua o el goteo, sino también sonidos humanos, incluyendo la propia habla. Los músicos expertos en *khomus* pueden codificar textos que un oyente avezado puede decodificar.

Sin embargo, la gente de Tuva considera que el canto diafónico, imitativo, es lo que más les une a su entorno. Es el medio más apreciado de un lenguaje expresivo que empieza donde termina el lenguaje verbal. Para los pastores, da rienda suelta a sentimientos de exultación e independencia que no pueden expresarse con palabras. Y, como suele suceder en el arte tradicional, la libertad interior florece dentro de las limitaciones más estrictas; en este caso, los límites físicos de las series armónicas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PRINCIPLES OF VOICE PRODUCTION. Ingo R. Titze. Prentice Hall, 1994.

A TUVAN PERSPECTIVE ON THROAT SINGING. Mark van Tongeren en *Oideion: The Performing Arts Worldwide*, volumen 2, páginas 293-312. Dirigido por Wim van Zanten y Marjolijn van Roon. Centre of Non-Western Studies, University of Leiden, 1995.

THE HUNDRED THOUSAND FOOLS OF GOD: MUSICAL TRAVELS IN CENTRAL ASIA (AND QUEENS, NEW YORK). Theodore Levin, Indiana University Press, 1997.

El nacimiento de las matemáticas sociales

En el Siglo de las Luces, Condorcet y otros trataron de aplicar las matemáticas al estudio del hombre y de la sociedad

Pierre Crépel

¿Qué aconteció entre 1750 y 1830 para que los historiadores vean en ese intervalo temporal el período de nacimiento de las ciencias del hombre y de la sociedad, y, en particular, de las matemáticas sociales?

Nadie dice que los que manejan el dinero o ejercen el poder hubieron de esperar hasta la segunda mitad del siglo XVIII para poner las matemáticas al servicio de sus intereses. Desde la antigüedad se han venido realizando censos de población, con finalidades hacendísticas o militares. En la Edad Media, los asuntos monetarios fueron objeto de cálculos sagaces, y los matemáticos más eminentes, desde Leonardo de Pisa (el célebre Fibonacci) hasta Newton, pasando por Luca Pacioli, Nicolás Oresme y Nicolás Copérnico, fueron solicitados por príncipes y comerciantes para estudiar diversas cuestiones económicas.

Se trata, empero, de cuestiones particulares. No se aprecia el propósito de aplicar las matemáticas a un vasto conjunto de problemas concernientes al hombre y a la sociedad y, menos aún, de unificar su metodología, de dotarla de fundamentos teóricos sólidos.

La aritmética política

A finales del siglo XVII asoma por el horizonte una forma más sistemática de utilizar el cálculo. John Graunt y William Petty, en Inglaterra, Jan de Witt, en Holanda, y Sébastien Le Pestre de Vauban, en Francia, crean una ciencia nueva, que es, como escribe Denis Diderot en la *Encyclopédie*, "aquella cuyas operaciones tienen por finalidad investigaciones útiles para el arte de gobernar los pueblos, tales como las del número de hombres que habitan un país; de la cantidad de alimento que deben consumir; del trabajo que pueden realizar; del tiempo que van a vivir; de la fertilidad de las tierras; de la frecuencia de los naufragios, etcétera".

Esta ciencia sigue consistiendo todavía en poner técnicas científicas, en esencia, existentes ya, al servicio de un "arte". Tal práctica va por entonces sumándose progresivamente a otras dos: la estadística descriptiva "alemana" y el cálculo de probabilidades. Consiste la primera en la recopilación de datos cualitativos y cuantitativos de todas las procedencias; la segunda abre un campo de matemáticas puras. La aritmética política requiere, en efecto, una cuidadosa recolección de hechos, un mínimo de crítica sobre su fiabilidad y homogeneidad, amén de métodos matemáticos que permitan formular conjeturas y evaluaciones en situaciones un tanto inciertas.

A lo largo del siglo XVIII, aparecen fenómenos que enriquecen gradualmente esas tentativas de descripción de la sociedad. De entrada, el movimiento enciclopédico, en su versión francesa, dirige a todas las cosas una mirada científica y filosófica. Nada resume mejor esta mentalidad que la siguiente apreciación del marqués de Condorcet sobre el econo-



1. UNA CENA DE FILOSOFOS: d'Alembert, Voltaire, Condorcet y Diderot.



D'ALEMBERT, según La Tour (1788)

"Perdonad, Señor, si un geómetra ha osado haceros una observación sobre un lugar de vuestro libro en el que utilizáis el lenguaje de la geometría. Decís que el precio se halla en razón inversa del número de vendedores, y en razón directa del de compradores. Bien sé que el precio aumenta cuando el número de compradores aumenta, y que disminuye cuando crece el de vendedores; ¿pero lo hace en igual razón? Esto es lo que yo no creo. Así, en este caso, y en todos los de su naturaleza, el lenguaje geométrico, lejos de conducirnos a ideas más precisas, me parece que induce a error; uno se dice que el autor se habría contentado con el lenguaje ordinario de no haber querido hablar de una proposición rigurosamente exacta."
(Condorcet, ed. INED, 1994, págs. 70-71)



CONDORCET, grabado por Vérité

2. AL RESPECTO DE LA UTILIZACION de matemáticas en las ciencias humanas es habitual contraponer a d'Alembert, crítico severo, y a Condorcet, sumo entusiasta. En realidad, ambos enciclopedistas demuestran permanecer atentos a las condiciones de aplicación de las matemáticas a las ciencias sociales. De que así es da testimonio este extracto de una carta de Condorcet al economista italiano Pietro Verri, el 7 de noviembre de 1771.

mista e inspector general de finanzas Robert Jacques Turgot: "[Él] estaba persuadido de que las verdades de las ciencias morales y políticas eran susceptibles de la misma certeza que las que constituyen el sistema de las ciencias físicas."

Tal convicción es aplicada no sólo al análisis de las cuestiones "morales y políticas", vale decir, humanas y sociales, sino también orientada a la acción, hacia la reforma racional de la administración, del derecho, de la economía y de la política. Es reflejo de un movimiento italiano, avivado durante todo el siglo, por las corrientes galileanas. Ceva, Grandi, Ortes, Beccaria o Pietro Verri lanzan las premisas de una matematización de la economía, vale decir, una visión formal, prematemática, de la justicia y del "cálculo de la felicidad".

El programa de Condorcet

Por una aceleración bastante brusca, en el decenio de los ochenta del siglo XVIII, las reflexiones anteriores desembocan en una concepción renovada de la "aritmética política", a saber, la "matemática social" de Condorcet. En 1770, en uno de sus primeros manuscritos, previstos para una enciclopedia que no llegaría a ver la luz, escribía acerca de la matemática política: "Esta ciencia no exige, en la mayoría de sus problemas, sino un conocimiento muy elemental de las matemáticas, pero: 1.º Dado que conduce al cálculo de probabilidades, se carece de principios bien determinados, como ha hecho ver M. d'Alembert. 2.º Es muy difíciles [sic] tener observaciones exactas, y todavía más, reducirlas a una forma en la que poder aplicar el cálculo. 3.º Las hipótesis que a veces es preciso hacer son casi todas gratuitas. Esta ciencia puede, pues, ser considerada como casi nueva."

El panorama, en 1784 y 1785, es enteramente distinto. Condorcet ha organizado todo su programa y conducido a buen puerto ciertas partes esenciales. Ha construido el soporte filosófico necesario, enunciando la teoría del "motivo de creer". Ha expuesto a la luz las dificultades lógicas que entraña el paso de un conjunto de juicios individuales a un juicio colectivo: la que hoy denominamos "paradoja de las votaciones" de Condorcet. Ha elaborado diversas soluciones para problemas espinosos de las probabilidades (consideración del tiempo, forma de retrotraer efectos a causas, examen de los distintos modos para condensar mediante un número fijo una magnitud asociada al azar, etc.).

Se encuentra, pues, en situación de extender el objeto y las ambiciones de la aritmética política, que engloba así los problemas de población, la economía política, los seguros, la teoría de las elecciones, las reglas del derecho... en pocas palabras, "los hombres y las cosas". La obra fundamental que publica Condorcet, *Essai sur la l'application de l'analyse* (1785), expone, en un ejemplo (el de las probabilidades de los juicios), la forma en que ello es posible. Raras veces habrá recibido una obra tantas lisonjas de sus coetáneos, y al mismo tiempo habrá sido tan poco leída o tan mal comprendida; las reseñas y críticas dan cuenta de ella con respeto y admiración, pero son incapaces de resaltar los aspectos más innovadores; todo el mundo hojea el "Discurso preliminar", pero nadie se arriesga a seguir los cálculos.

Reticencias y algunas matizaciones

Nuestra exposición ha sido, hasta ahora, lineal y unilateral. En efecto, el empleo del cálculo en las cuestiones sociales o humanas ha

PIERRE CREPEL, historiador de la ciencia, se halla adscrito al ente público francés de investigación, el CNRS, y la Universidad de Lyon I.

sido objeto de crítica permanente. Las objeciones proceden de filósofos, de economistas y de matemáticos propiamente dichos, empezando por Jean Le Rond d'Alembert, maestro de Condorcet. Denuncian éstos su empleo precipitado y demasiado poco precavido, o vuelven a poner en entredicho la posibilidad misma de maridaje entre las matemáticas y las ciencias morales o políticas.

El debate se desencadena hacia 1760: d'Alembert protesta contra la forma en que Daniel Bernoulli se vale del cálculo, y sobre todo, de las probabilidades, con el fin de evaluar la conveniencia de la inoculación variólica. Varias son las cuestiones que nutren esta agria polémica: la distinción entre los intereses de un individuo y los de un Estado, la dificultad (o imposibilidad) de comparar los riesgos correspondientes a sucesos susceptibles de acontecer en distintas épocas, e incluso ciertos fundamentos de lo que nosotros denominamos hoy "estadística matemática". D'Alembert critica, a su vez, la apresurada utilización del lenguaje algebraico por los filósofos. El propio Condorcet acepta mal el formalismo, que estima ilusorio, de economistas como P. Verri y su amigo, el matemático Frisi. También el abate André Morellet, pese a su cercanía a Turgot, y convencido del valor científico de sus teorías económicas, explica su propio escepticismo:

"En general, tengo poca fe en la aritmética política, no porque me oponga a sus resultados, una vez admitidos los elementos del cálculo, sino porque veo, a las personas más diestras en estas materias, elegir mal los elementos" (carta a W. Petty, 25 de agosto de 1780).

Morellet estima que la economía política tiene poco que esperar de las matemáticas. Subraya que la variabilidad de los datos, su carencia de homogeneidad y la imposibilidad de definir los conceptos sin cierta vaguedad tornan ilusorios los resultados numéricos, y su utilización, pura adoración de las cifras.

Surge, por otra parte, un debate sobre la idónea aplicación de las matemáticas. En los estudios de economía, los matemáticos se inclinan, ora por un proceder deductivo, axiomático, normativo, ora hacia una metodología inductiva, que consiste en ir modestamente desgajando leyes a partir de recopilaciones de datos casi en bruto. En las postrimerías del siglo XIX, esta distinción situará en campos opuestos a la economía matemática y a la econometría, toma de posiciones perceptible ya en el Siglo de las Luces, por ejemplo, en Beccaria y en Verri, entre los enciclopedistas milaneses.

¿Constituye la elaboración de una matemática social en esos años ochenta un hecho puramente francés, vale decir, puramente condorcetiano? La respuesta no es sencilla. Hemos visto que el movimiento hacia el enfoque científico de las cuestiones sociales resulta de la convergencia de ideas ampliamente compartidas. Los enciclopedistas franceses confiesan una gran admiración por el filósofo inglés John Locke. Los historiadores han señalado, asimismo, el parentesco entre cierto número de sus teorías con las del filósofo escocés David Hume. Condorcet está cercano a Richard Price, el prohombre de la aritmética política inglesa de la segunda mitad del siglo XVIII, autor de notables tablas de mortalidad. El pastor Süssmilch, en Alemania, publica en 1741 una obra fundamental, reeditada varias veces, *El orden divino*, que también promociona la aritmética política.

El examen de las diversas ediciones de las enciclopedias del siglo, las traducciones, los resúmenes y recensiones de las revistas reflejan la multitud de iniciativas para contar, medir o calcular, en los problemas que atañen al hombre. A pesar de ello, cuando se trata de utilizar las matemáticas más delicadas, de construir una teoría coherente de la matemática social, en breve, de ensamblar las distintas ambiciones antedichas, nos percatamos de que los candidatos para esta aventura son poco numerosos. Las tentativas se deben, en esencia, a unos pocos autores franceses o italianos; ninguno ha llevado tan lejos su audacia como Condorcet. Incluso en el seno de la Academia de Ciencias de París, de la que es secretario,

La inoculación variólica


Edward Jenner

Según la *Encyclopédie* de Diderot-D'Alembert, la inoculación, "sinónimo de inserción, ha prevalecido para designar la operación por la cual se comunican artificialmente las viruelas, con la intención de prevenir el peligro y los estragos de esta enfermedad contraída de forma natural".

En el siglo XVIII, la infección variólica es responsable de 50.000 a 80.000 muertes anuales, especialmente entre los niños. A mediados del siglo XVIII, los médicos observan que ciertos individuos resisten a la reinfección. Se prueba entonces, a pesar de los riesgos, a inocular la viruela por escarificación con costras variólicas. La proporción de óbitos provocados por la inoculación no es desdeñable, pero la práctica está en boga entre las clases privilegiadas: los nietos de Luis XV, fallecido de viruelas, que serán los futuros Luis XVI, Luis XVIII y Carlos X, se hacen inocular. Según Voltaire, "la nación está emocionada e instruida".

La inoculación suscita una doble disputa. En primer lugar, sobre la pertinencia de esta práctica y, principalmente, sobre su generalización; acto seguido, y entre diversos sabios, partidarios de la inoculación, sobre la forma de calcular su "ventaja". Esta última cuestión exige estudios de carácter estadístico y probabilístico, precursores de la epidemiología.

A partir de 1796, y merced a las observaciones del médico británico Edward Jenner, la inmunización del hombre se logra inyectándole, no las viruelas propiamente dichas, sino una enfermedad próxima, la viruela de las vacas; el procedimiento resulta así menos peligroso, más eficaz y más fácil de generalizar que la inoculación. Ha nacido la vacunación.

se encuentra un tanto aislado. Una carta del académico Jacques-Antoine-Joseph Cousin a su correspondiente en Toule, Charles-François Bicquilley, revela que los miembros de la prestigiosa sociedad apenas creen en la posibilidad de una "teoría matemática de los seguros marítimos", a cuyo respecto han lanzado un concurso, por presión de Condorcet.

Asistimos, de hecho, a un rasgo característico de las Luces: existen grandes proyectos científicos, pero ni los medios de cálculo de la época, ni las recolecciones de datos, ni tampoco los instrumentos matemáticos, permiten concretarlos. Las intuiciones eran en ocasiones fulgurantes, pero casi siempre mal acabadas y escasamente operativas sobre el terreno.

Una lenta maduración

La Revolución Francesa y el Imperio someten las teorías políticas y sociales al fuego de la práctica. Emergen entre los humanistas diversas tendencias. Por una parte, los matemáticos más o menos salidos del ambiente enciclopedista, Pierre Simon de Laplace, Joseph Fourier y Gaspard Monge, influyen en la vida política y aplican en ella métodos emanados de sus convicciones científicas. Por otra, los reflujos no se hacen esperar: los ideólogos (Cabanis, Destutt de Tracy y Volney), pese a ser discípulos de Condorcet, relativizan la conveniencia y la posibilidad de utilizar a las matemáticas en tales dominios. Los románticos erigen una barrera casi estanca entre el campo de pertinencia del cálculo y el hombre en todas sus dimensiones (individual, social y espiritual). Incluso los filósofos que, caso de Auguste Comte, son sensibles a la extensión de la marcha científica, se niegan a hacerle sitio, por mínimo que sea, al cálculo de probabilidades.

Pese a todo, en la primera mitad del siglo XIX, se intenta la resolución de problemas sociales con ayuda de las matemáticas. Cierto es que Siméon-Denis Poisson (el inventor de la ley de distribución de probabilidades que lleva su nombre) y Antoine-Augustin Cournot tienen concepciones originales sobre las relaciones entre las matemáticas y la sociedad, que vemos reflejadas, por ejemplo, en sus trabajos sobre estadísticas delictivas: el número de juicios (procesos) permanece notablemente regular de año en año, lo que sugiere que constituye un parámetro intrínseco de la sociedad.

Los seguros marítimos

En 1783, la Academia de Ciencias detalla sus intenciones relativas al concurso convocado por ella, en el que solicita *una teoría matemática de los seguros marítimos*: "Por Teoría de Seguros se entiende, concretamente, la aplicación del cálculo de probabilidades a las cuestiones relativas a los seguros; esta materia ha sido tratada ya por varios geómetras célebres.

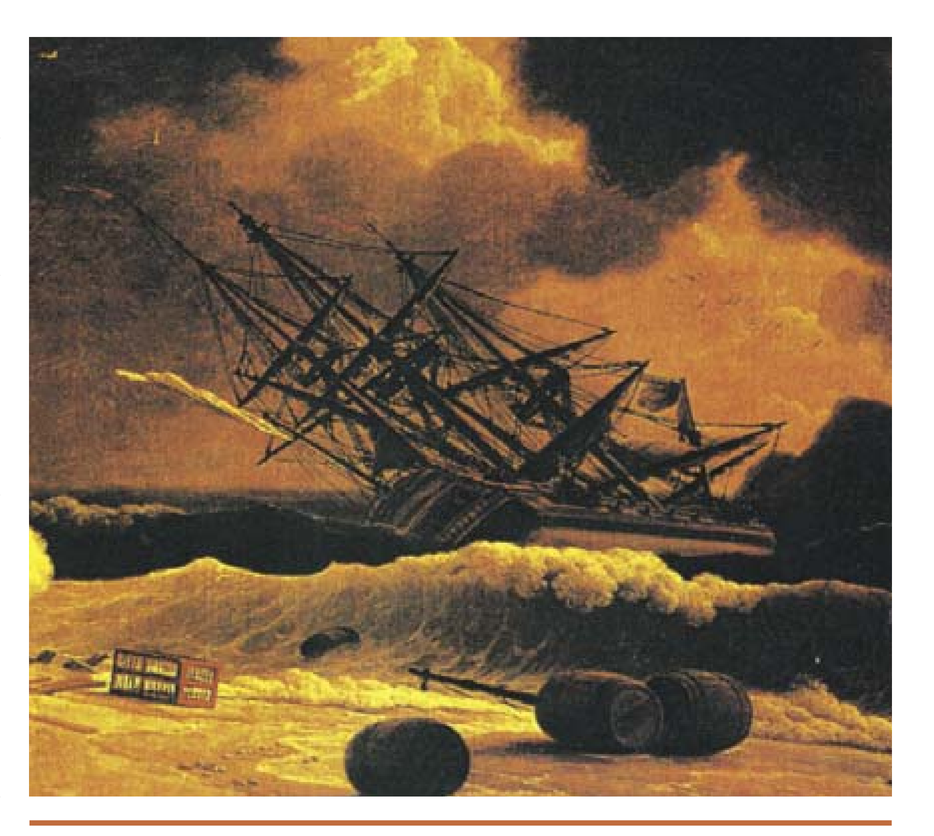
"Como el riesgo al que el Negociante & el Asegurador están expuestos, el uno, antes de haber tomado el seguro, el otro después de haber asegurado, no puede ser conocido sino por acontecimientos anteriores en un comercio similar, se pide la manera de determinar este riesgo a partir de los sucesos, sea para una sola embarcación, sea para un número determinado de naves.

"Suponiendo que el riesgo sea conocido, se pregunta a continuación qué proporción se ha de establecer entre el riesgo & la prima de seguro, para poder satisfacer a una y otra de estas dos condiciones, a saber, que al Negociante le convenga tomar el seguro a este precio & que el Asegurador encuentre en él su beneficio. Esta cuestión deber ser resuelta en dos hipótesis diferentes, primero, suponiendo que el Negociante se decida a tomar el seguro antes de que sus fondos sean expuestos a ningún peligro, y después, suponiendo que no toma el seguro hasta después de encontrarse sus fondos ya expuestos.

"Por último, supuesto conocido por los registros el número de naves que han perecido, & el número de las que han escapado al peligro, así como las diferentes primas e indemnizaciones a las cuales han sido aseguradas en diferentes circunstancias & por diferentes grados de riesgo; proponemos hallar la ley según la cual los Aseguradores y los Negociantes han ajustado la relación entre el riesgo y la tasa de los seguros, es decir, cómo han resuelto entre ellos, por la práctica, la cuestión a la que arriba se solicita solución teórica. Mediante ella, se podrá comparar la práctica de los Negociantes & de los Aseguradores, con los resultados que ofrezca la Teoría.

"La Academia exige solamente que los Concursantes establezcan & discutan los principios sobre los que han de fundarse las soluciones de estas diferentes cuestiones, & den las fórmulas que encierren estas soluciones, de modo que puedan ser inmediatamente aplicables en la práctica."

(*Journal de Paris, 14 de mayo de 1783, págs. 561-562*)



El hombre promedio de Quetelet

Los sabios de la primera mitad del siglo XIX quedaron sorprendidos por la regularidad de los datos estadísticos relativos al mundo humano. Establecen un paralelismo con el mundo natural:

"¿No sería absurdo creer que mientras todo obedece a leyes tan admirables, sólo la especie humana permanece ciegamente abandonada a sí misma, y que no posee principio de conservación alguno? Nosotros no tememos decir que una suposición tal resultaría más injuriosa para la divinidad que la investigación misma que nosotros nos proponemos realizar" (Quetelet, *Du système social et des lois qui le régissent*, 1848).

El sabio belga precisa:

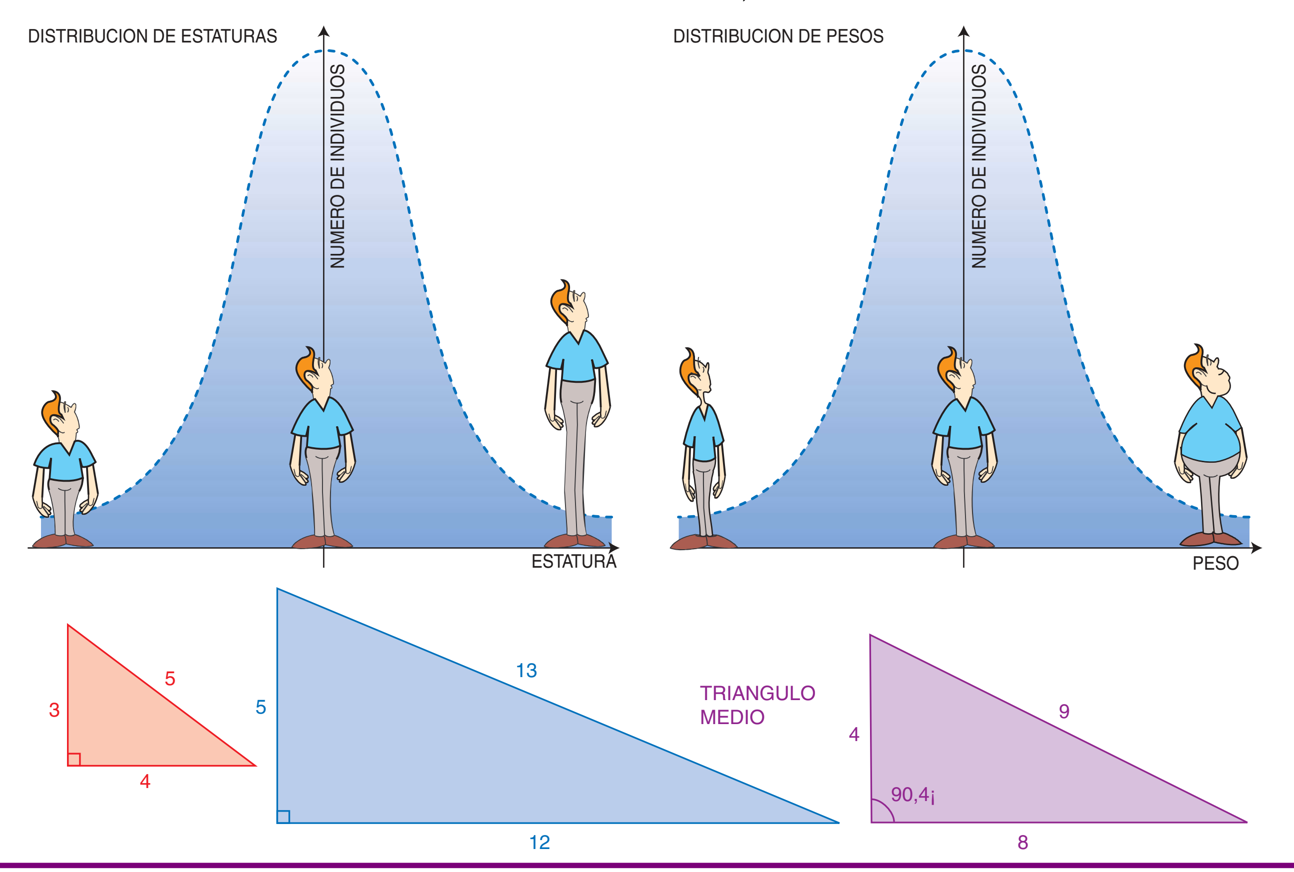
"Situándonos en circunstancias favorables para observar correctamente, encontramos que, en los seres organizados, todos los elementos están sujetos a variar en torno de un estado medio, y que las variaciones que nacen por influencia de causas accidentales, están ajustadas con tanta armonía y precisión, que resulta posible clasificarlas de antemano numéricamente y por orden de magnitud, en los límites en los que se producen. Todo está previsto, todo está regulado: solamente nuestra ignorancia nos lleva a creer que todo está abandonado al capricho del azar."

Adolphe Quetelet

De las reflexiones anteriores se deduce la idea de un hombre promedio, cuyas características todas (por ejemplo, las medidas de los órganos, o también, cualidades más abstractas, como la propensión al delito o al alcoholismo) habrían de ser las medias de las características de hombres reales. Esta idea fue vigorosamente atacada por diversos científicos influyentes, desde el economista Antoine-Augustin Cournot hasta el sociólogo Émile Durkheim: tales medidas raramente constituirían un hombre, y de hacerlo, sería un monstruo. En apoyo de esta última afirmación se trae a colación la paradoja (más simple) de los triángulos rectángulos: tomemos varios triángulos rectángulos y hallemos la media de sus lados. ¡Las longitudes así obtenidas no podrán, en general, representar los lados de un triángulo rectángulo!

Veamos un ejemplo. Los lados de un triángulo rectángulo tienen longitudes de 3, 4 y 5 centímetros (se trata, ciertamente, de un triángulo rectángulo, porque se verifica la relación pitagórica: $5^2 = 4^2 + 3^2$). Los lados de un segundo triángulo rectángulo tienen longitudes de 5, 12, y 13 centímetros (y se tiene, de nuevo, $13^2 = 5^2 + 12^2$). Los lados del triángulo medio de estos dos tendrán longitudes 4 (media de 3 y 5), 8 (media de 4 y 12) y 9 (media de 5 y 13). Este triángulo no es rectángulo (aunque pueda parecerlo a simple vista), pues no se verifica el teorema de Pitágoras: $9^2 = 81$, mientras que $4^2 + 8^2 = 80$.

Así pues, las características medias de un objeto definen otro objeto, y no la media de este objeto. De igual forma que la media de varios triángulos rectángulos no constituye un triángulo rectángulo, así el hombre promedio de Quetelet es, según Cournot, un monstruo.



Poisson y Cournot parecen hallarse aislados, pero en la misma época, un sabio belga, Adolphe Quetelet, director del Observatorio de Bruselas, retoma el estandarte de una "física social" en la que el cálculo de probabilidades desempeña una función central. Formado en la escuela laplaciana, que enseña a distinguir las causas constantes de las variables y accidentales, Quetelet construye su teoría del "hombre medio", considerando que el hombre real es una variable aleatoria (distribuida según la ley de Laplace-Gauss) en torno a un tipo medio. Según él:

"Uno de los hechos principales de la civilización (y uno de los efectos principales de la ciencia) consiste en restringir cada vez más los límites entre los que oscilan los diferentes elementos relativos al hombre."

Su trabajo más cautivador es su análisis de la influencia de factores como el sexo, la edad, la educación, el clima y las estaciones sobre la tasa de criminalidad en Francia (1831). Las cifras no permitían saber por adelantado quién iba a cometer un determinado delito, pero, según él, las regularidades de los números permitirían a un especialista "prever el número de individuos que se mancharían las manos con la sangre de sus semejantes, el número de falsificadores y el número de envenenadores". El descubrimiento de tales regularidades llevaba a Quetelet a una conclusión radical: "En cierto modo, es la sociedad la que prepara todos estos crímenes, siendo los criminales meros ejecutores."

El cálculo actuarial

El Estado toma en préstamo una suma importante S (por ejemplo, para financiar una guerra) que reembolsa después en anualidades: devuelve a al cabo de un año, otra vez a al cabo de dos años, y así durante n años. ¿Cómo se calcula la anualidad a en función de S y del tipo de interés t?

Respuesta. La transacción se considera equitativa si el "valor actual" del conjunto de anualidades abonadas es igual a S. Por definición, el valor actual de un importe a, a pagar dentro de un año, es la cantidad que, colocada hoy al tipo t tendría el valor a al cabo de un año; es decir: $a/(1+t)$. Si a se paga dentro de dos años, su valor actual es $a/(1+t)^2$, y así sucesivamente, año tras año.

Dicho de otro modo, la transacción es equitativa si, para una renta a plazo de n años, la anualidad a es tal que:

$$S = a/(1+t) + a/(1+t)^2 + \ldots + a/(1+t)^n$$
$$= a/t \times [1 - t/(1+t)^n]$$

En el caso de una renta perpetua (es decir, para n infinito), se tendrá, pues, $S = a/t$. ¿Cuál es la fórmula correspondiente a una renta vitalicia? El número n, igual al número de años que faltan para el fallecimiento del acreedor, no es conocido de antemano. Habremos de contentarnos con un cálculo estimativo, dependiente de la edad del prestamista, valiéndonos de tablas de mortalidad apropiadas. Por utilizar el lenguaje del cálculo de probabilidades, ello equivale a considerar n como una variable aleatoria, e igualar después S a la esperanza matemática del valor actual del conjunto de anualidades por reembolsar. La esperanza matemática es igual a la suma de las anualidades, multiplicada cada una por la probabilidad de deceso del prestamista a la edad considerada.

Hacia las ciencias sociales modernas

Hemos visto que, a partir del tercer cuarto del siglo XVIII, las ciencias sociales y políticas se han ido transformando, explícitamente a veces, más veladamente, otras. La Academia de Ciencias, y con mayor generalidad, los sabios, han adquirido una legitimidad en la vida política. Por influjo de Condorcet y de Laplace, las instituciones enseñan análisis. Contrariamente a Condorcet en su época, Quetelet disfruta de una multitud de recopilaciones estadísticas, que dirigen, por ejemplo, los prefectos del Imperio; merced a estos datos puede comparar sus construcciones teóricas con resultados empíricos. La pasión de Quetelet es, sobre todo, la de edificar instituciones y se convierte en el incansable organizador de congresos de estadísticas, en los cuales los sabios intercambian ideas y confrontan sus reflexiones con los datos. Aun cuando tales congresos no tengan los mismos objetivos que el futuro Instituto internacional de estadísticas (creado en 1885), no por ello dejan de ser antepasados de la ciencia social de nuestros días.

En la misma época, algunos médicos, como Pierre-Charles-Alexandre Louis y Jules Gavarret, emprenden una difícil lucha, en una atmósfera con frecuencia hostil, para introducir en medicina "el método numérico". Gavarret expresa incluso visiones proféticas y teorías más que embrionarias para la epidemiología. Con mayor generalidad, en diversos dominios, ven la luz tentativas aisladas, pero el siglo XIX permanece remiso al empleo sistemático de las matemáticas en lo atinente al hombre, al arte, a la política y a la economía. Esta reticencia perdura cuando menos hasta las postrimerías del siglo, hasta el punto de que hacia 1880, Condorcet, Poisson, Cournot e incluso el economista Léon Walras son objeto de sarcasmos del secretario perpetuo de la Academia de Ciencias, el matemático Joseph Bertrand.

La utilización de matemáticas se limita sobre todo a estudios demográficos y actuariales, en plena floración, y un poco, a las estadísticas delictivas. El proyecto de la Ilustración, que se proponía cristalizar en teorías coherentes las visiones científicas, prácticas y filosóficas concernientes al hombre, parece enterrado y la explosión de las ciencias sociales matematizadas habrá de esperar hasta mediados del siglo XX.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUR L'HOMME ET LE DÉVELOPPEMENT DE SES FACULTÉS, OU ESSAI DE PHYSIQUE SOCIALE. Adolphe Quetelet, Bachelier, París, 1835.

EXPOSITION DE LA THÉORIE DES CHANCES. Antoine-Augustin Cournot, Vrin, París, 1984 (ed. original 1843).

ESSAI PHILOSOPHIQUE SUR LES PROBABILITÉS. Pierre-Simon Laplace, C. Bourgois, París, 1986 (ed. original 1814).

ARITMÉTIQUE POLITIQUE. Condorcet, Textes rares ou inédits, INED, París, 1994.

THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DU COMMERCE. Charles-François Bicquilley, Carez, Toul, 1804. Reedición, Aléas, Lyon, 1995.

LE PREMIER ACTUAIRE DE FRANCE: DUVILLARD (1755-1832). Guy Thuillier, Comité de Historia de la Seguridad Social, París, 1997.

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Un contador de iones atmosféricos

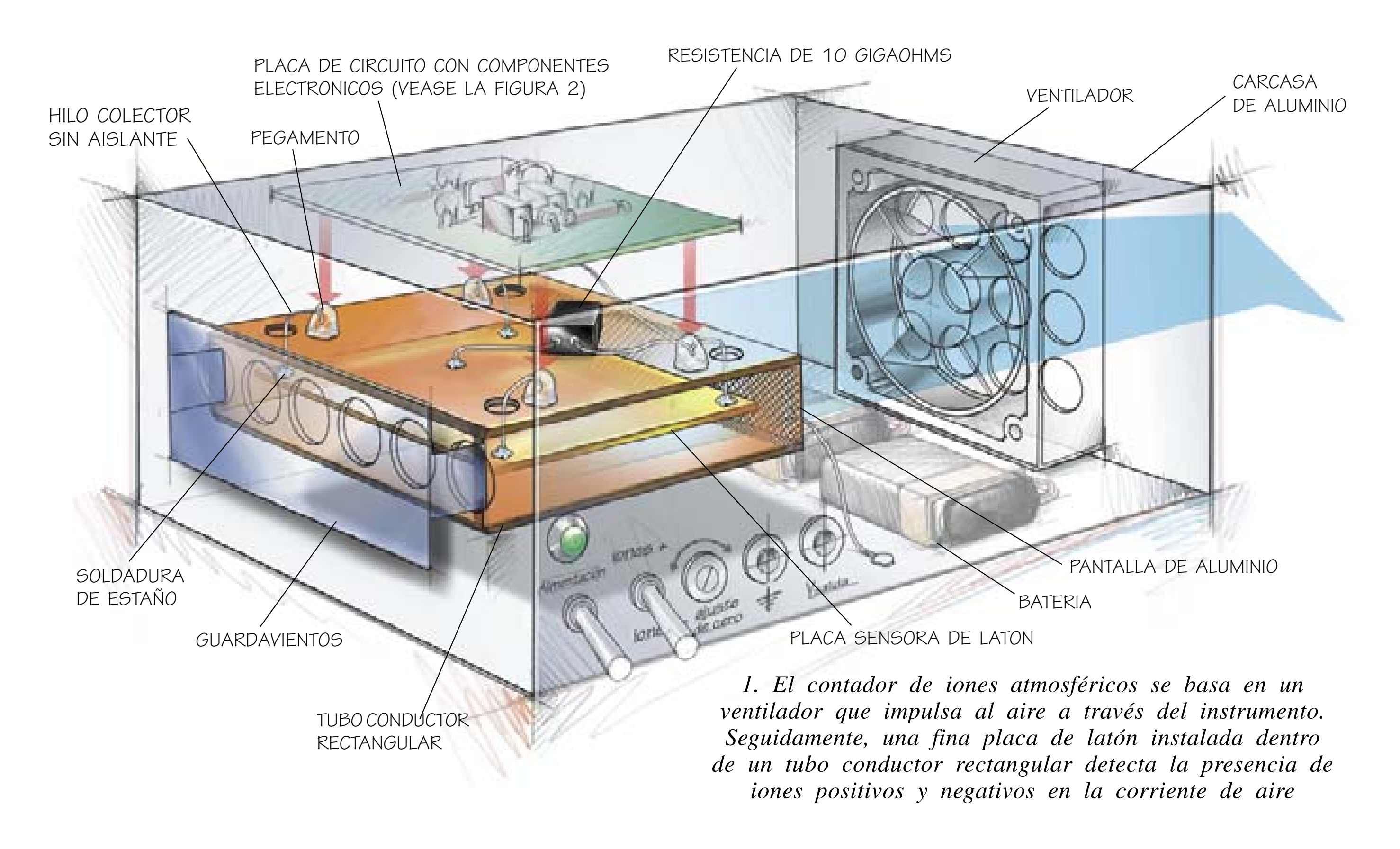
Siempre renovada por los millares de tormentas que sin cesar se abaten sobre nuestro planeta, la carga eléctrica terrestre produce un campo eléctrico cuya intensidad característica ronda los cien metros por cada metro de elevación; puede dispararse hasta miles de volts por metro cuando una tormenta retumba sobre nuestras cabezas. En el artículo de septiembre expuse cómo medir esos campos con un delicioso instrumento llamado medidor de campos. De no ser porque la atmósfera terrestre contiene muy pocas cargas libres (iones y electrones no ligados), indiqué, todos resultaríamos electrocutados instantáneamente; por lo mismo, tan intensos campos eléctricos no pueden generar corrientes peligrosas. Aprenderemos este mes a medir la densidad de esas cargas.

En cada fracción de segundo, los rayos cósmicos detraen electrones de las moléculas neutras que pueblan nuestra atmósfera. La ionización la provocan también la luz ultravioleta, los incendios y la desintegración radiactiva de ciertos elementos. Esos procesos confieren una carga positiva a algunas moléculas atmosféricas, al tiempo que crean una suerte de neblina de electrones, captados varios de ellos por otros átomos. Así es como la atmósfera contiene iones positivos y negativos.

Esas partículas son extremadamente escasas. De las $2,5 \times 10^{19}$ moléculas que hay en cada centímetro cúbico del aire contenido en nuestros hogares, sólo unas exiguas 200 portan un exceso de carga negativa, mientras que 250 están cargadas positivamente. (Al aire libre, las concentraciones suelen ser mayores.) Sin embargo, con un instrumento que podemos construir sin gran dispendio detectaremos esas pequeñísimas cantidades. Nuestro instrumento casero, que debemos a Bill Lee, de AlphaLab en Salt Lake City, es la versión simplificada de un dispositivo comercial mucho más refinado que vende AlphaLab (www.trifield.com).

Para impulsar aire a través de un tubo conductor rectangular, el instrumento se vale de un ventilador de corto tamaño. Por dentro del tubo el aire avanza sobre una placa de latón de poco espesor conectada a tierra mientras que el potencial eléctrico del tubo se ajusta a +5 o –5 volts. La primera repele los iones positivos hacia la placa central, donde esos iones captan electrones y se neutralizan. El segundo impulsa los iones negativos hacia la placa, donde depositan su exceso de electrones. Una y otra acción producen el paso de una corriente eléctrica a través de una resistencia, creando una caída de tensión proporcional, que podemos medir tras amplificarla con un circuito muy sencillo.

El tubo conductor rectangular, de medidas $7,6 \times 7,6 \times 1$ cm, puede construirse mediante cuatro placas de circuito chapadas en cobre por ambas caras. Las superficies interiores deben todas conectarse, de modo que puedan activarse a +5 o –5 volts. Sin embargo, la superficie superior debe mantenerse a tierra y hay que aislarla eléctricamente.



1. El contador de iones atmosféricos se basa en un ventilador que impulsa al aire a través del instrumento. Seguidamente, una fina placa de latón instalada dentro de un tubo conductor rectangular detecta la presencia de iones positivos y negativos en la corriente de aire

Para la placa sensora de latón, compremos láminas de esa aleación de las que recortar el material necesario. Se necesita un cuadrado de 6,4 cm de lado; conviene que la pieza sea mayor para fabricar con el resto un guardavientos que nos permita usar nuestro instrumento al aire libre.

Para que los campos eléctricos parásitos no estropeen las mediciones, cubriremos la abertura de corriente abajo con una pantalla de aluminio eléctricamente conectada al interior del tubo. Basta una batería de nueve volts para el funcionamiento del ventilador de 12 volts.

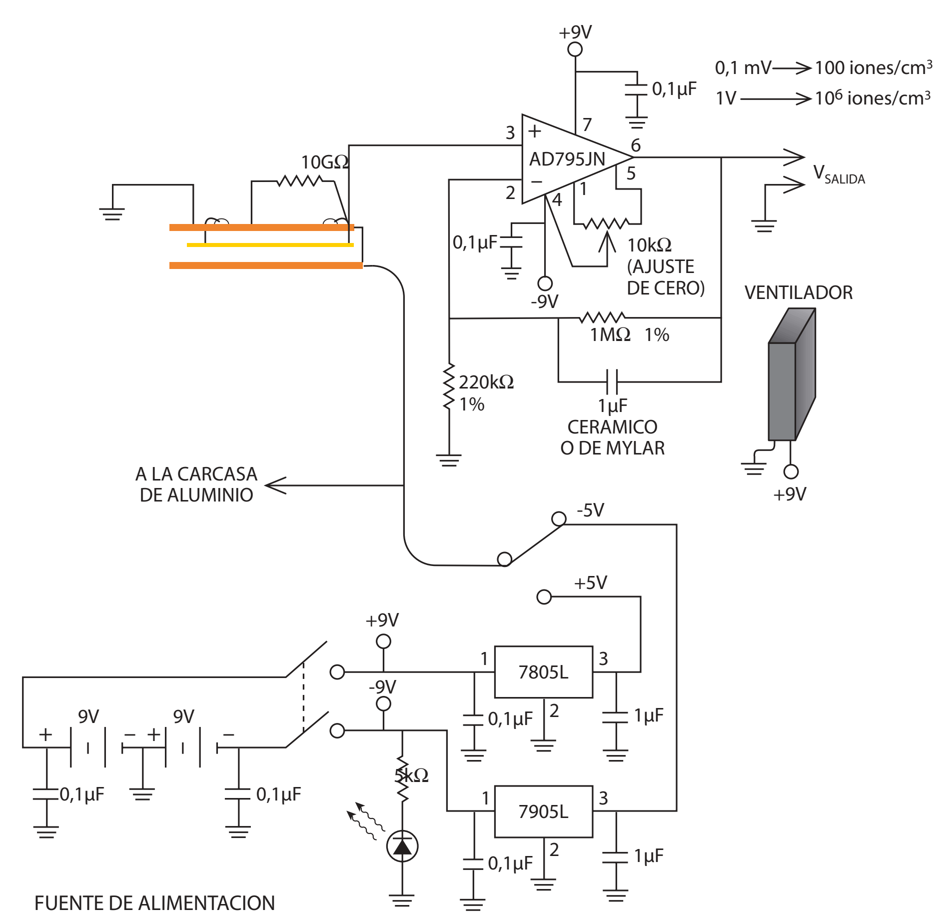
La corriente de señal será increíblemente mínima: los iones contenidos en el aire de nuestro domicilio quizá generen sólo 10^{-15} ampères. (Al aire libre, los focos a medir deben producir unas corrientes algo mayores.) Para convertirse en señal detectable, tan minúscula corriente debe atravesar una resistencia de muy alto valor; 10 gigaohms en este caso. Ohmcraft, de Honey Falls, vende esas monstruosas resistencias a unos diez dólares la unidad.

Pasada por una resistencia tan elevada, la señal insignificante genera unos 10 microvolts, que un amplificador operacional de gran impedancia, tal como el fiable AD795JN, puede aumentar. Por desgracia, otros componentes del circuito no ofrecen prestaciones similares; si queremos conseguir el nivel de precisión necesario hay que tomar precauciones.

La placa de circuito sobre la que se monten los componentes electrónicos debe estar libre de contaminación superficial; si no, podría darse un paso de corriente en exceso. Esa placa hay que limpiarla con alcohol; nos lavaremos a fondo las manos con jabón antes de tocarla.

Por el intersticio que separa la patilla 3 del amplificador operacional (conectada a la fuente de alimentación) de la patilla 4 (señal de entrada) pueden pasar minúsculas corrientes. Estas pueden ahogar una señal fina; por tanto, se impone doblar hacia arriba la patilla 3 para que no toque la placa del circuito. El hilo sensor de la resistencia de 10 gigaohms hay que conectarlo a esa patilla. Por último, para que no se formen campos eléctricos parásitos entre la carcasa de aluminio del instrumento y el tubo, conéctense ambos eléctricamente.

La operación correcta de nuestro contador requiere poner a tierra la placa sensora de latón a través de la resistencia de 10 gigaohms. A cada esquina de la placa suéldese (al es-



2. El circuito electrónico del contador de iones debe poder detectar corrientes eléctricas minúsculas, de hasta 10^{-15} ampères. Para ello, una resistencia de 10 gigaohms obliga a esa señal insignificante a generar unos 10 microvolts, que entonces pueden ser aumentados por un amplificador operacional de gran impedancia

taño, por supuesto) un trozo de hilo colector no aislado (de la galga 20 o más grueso). Seguidamente se abren cuatro orificios en la cara superior del tubo, sobredimensionados para pasar por ellos los hilos. Fíjense tres hilos encima de la superficie conductora del tubo, encapsulándolos dentro de otros tantos pegotes de pegamento procedente de una pistola de encolar en caliente. El pegamento resulta un aislador eléctrico óptimo, pero si entran en contacto adhesivo y metal de la cara interna del tubo, fluirá una corriente lo bastante intensa para estropear nuestras medidas. Tenemos que cerciorarnos, pues, de que el pegamento queda alejado de los orificios. A continuación, se suelda (también al estaño, por supuesto) una de las terminales de la resistencia de 19 gigaohm a la superficie superior del tubo y la otra al cuarto hilo. A esta unión se suelda también el hilo de señal y se fija a la superficie superior del tubo con pegamento caliente. Por fin, se une el otro extremo del hilo de señal a la patilla 3 del amplificador operacional.

Una vez listo para funcionar nuestro instrumento, bloquearemos la abertura para que no penetre aire. Ajustaremos el potenciómetro del circuito hasta que el voltímetro marque cero. Luego, pondremos en marcha el ventilador y dejaremos que penetre aire dentro del instrumento. Marcará entonces el voltímetro unos 0,2 volts, lo que corresponde a unos 200 iones por centímetro cúbico, y esa lectura debe saltar hacia adelante si mantenemos una llama junto a la admisión. Nuestro instrumento debe detectar aproximadamente el 66 por ciento de los iones presentes. (Para saber cómo medir el rendimiento de la detección y calibrar con precisión el instrumento, consúltese el lugar Web de la Society for Amateur Scientists.)

Con este instrumento, podemos observar la variación del recuento de iones a lo largo del día, en el curso del año y durante las grandes tormentas. Y como el gas radón aumenta el número de iones en los espacios cerrados, puede emplearse nuestro detector para comprobar la presencia de tan peligroso elemento.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Coreografías poliédricas

La construcción de figuras con hilos o cuerdas es un arte antiguo que cuenta con muchos adeptos de las matemáticas recreativas. Opté por titular mi último artículo sobre figuras con cuerdas "Un cálculo para la cuna del gato" [febrero de 1998], buscando plantear un posible sistema para la descripción de su intrincada geometría. Mi confianza en el carácter matemático del problema se vio rápidamente justificada por una serie de comunicaciones de los lectores, entre ellos, miembros de la Asociación internacional de figuras con cuerdas. Algunas de estas cartas exponían diversos sistemas de notación matemática para tales formas. Pero una suscitaba un aspecto inesperado: las conexiones entre las figuras con cuerdas, las matemáticas y la danza.

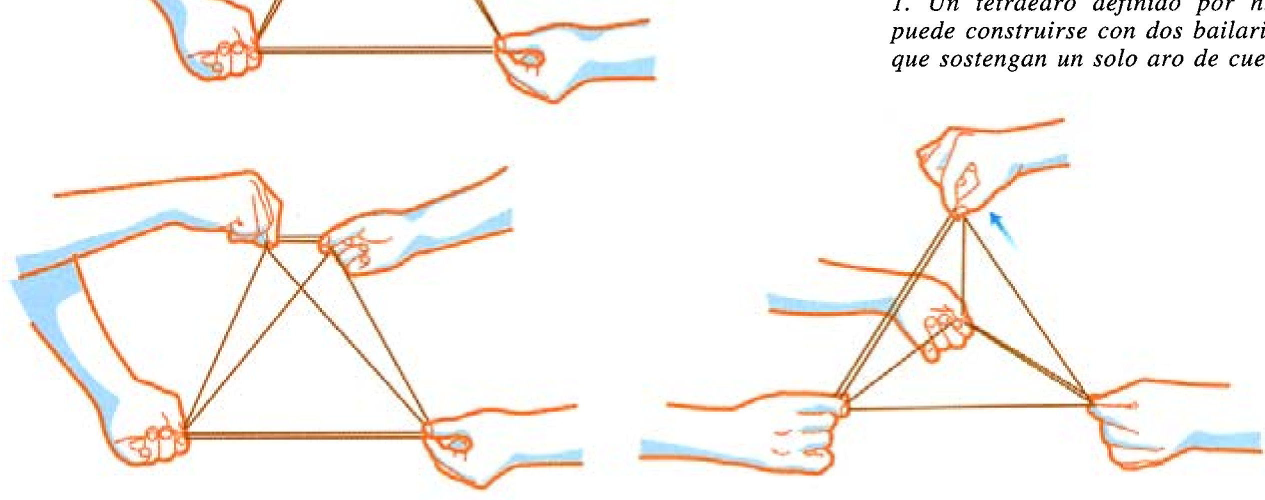
Son numerosos los vínculos entre las matemáticas y las artes; así, en pintura, la perspectiva, o en las escalas musicales, las progresiones geométricas. Pero el único nexo entre las matemáticas y el arte coreográfico del que yo tuviera noticia era un análisis de las simetrías de las danzas rurales inglesas, realizado hace años por Chris J. Budd. La carta aludida, remitida por Karl Schaffer, cofundador del "Dr. Schaffer and Mr. Stern Dance Ensemble", de Santa Cruz, me refería algo muy distinto, a saber, el empleo deliberado de matemáticas para la creación coreográfica. Schaffer daba detalles de diversas danzas que se valían de aros de cuerda para construir poliedros regulares y otras figuras.

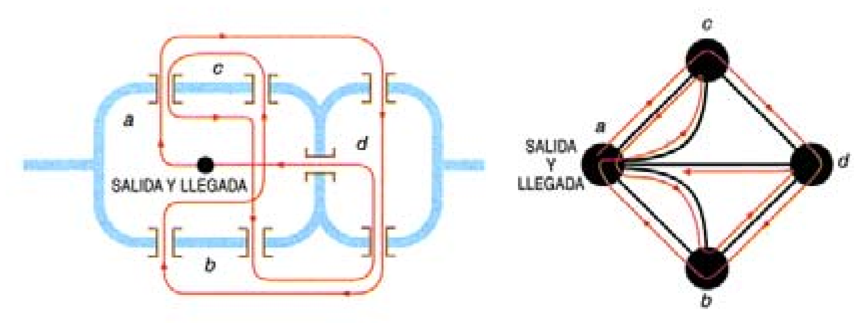
Schaffer empezaba diciendo que él y su compañero de danza, Scott Kim, se habían interesado por las figuras poliédricas con hilos en 1994, fecha en que concibieron un espectáculo llamado "Pasar por el aro, buscando el cuadrado perfecto". Es una de las cinco piezas con coreografía matemática del repertorio del Ensemble, concebidas con el propósito de exaltar ciertas ideas de carácter geométrico y la noción de simetría. En la preparación del espectáculo participó Greg Keith, que enseñó a Schaffer y a Kim algunas danzas tradicionales en las que dos bailarines trazaban figuras con cintas. Schaffer y Kim no tardaron en hallar ideas nuevas de su propia creación, entre ellas, configuraciones tridimensionales con cuerdas basadas en poliedros.

La figura 1 permite ver cómo pueden dos bailarines construir un tetraedro valiéndose de un aro de cuerda. El danzarín 1 se mantiene a la izquierda, y el 2, a la derecha, con el bucle de cordel entre ellos. Cada uno sostiene el extremo del aro con su mano derecha, y al mismo tiempo ase un poco más allá los dos cordeles con su izquierda. Actuando con simultaneidad, el danzarín 1 cruza la mano derecha sobre la izquierda, mientras el danzarín 2 separa las manos. Después, ambos extienden hacia adelante sus manos derechas, hasta casi tocarse. A continuación, cada uno ase con su mano derecha una de las líneas de la cuerda del otro, sin dejar de sujetar la porción propia. Hecho esto, el danzarín 1 desliza su mano derecha a lo largo del doble cordel que ahora está sosteniendo hacia su posición natural a la derecha. Finalmente, el danzarín 2 eleva su mano derecha, y el resultado es un tetraedro regular en el cual dos de las aristas son líneas dobles de cuerda, mientras que las otras cuatro aristas son líneas sencillas.

De forma similar, seis danzarines que sostengan seis bucles de cuerda pueden producir el cubo-octaedro,

1. Un tetraedro definido por hilos puede construirse con dos bailarines que sostengan un solo aro de cuerda





2. *Los puentes de Königsberg* (izquierda), *representados mediante un grafo* (derecha). *No puede existir un camino cerrado* (rojo) *que atraviese cada puente exactamente una vez*

poliedro semirregular que tiene seis caras cuadradas y ocho caras triangulares. La danza, más compleja todavía, comienza con un solo aro largo, sostenido por tres personas. Inicialmente, se le da al aro forma triangular, siendo manipulado después para convertirlo en tetraedro y en octaedro, cuerpo geométrico que tiene ocho caras triangulares. Se incorpora luego un cuarto bailarín, que ayuda a transformar el octaedro en un cubo. Se suman por fin al baile otros seis danzantes más, y el cubo es convertido, primero en un dodecaedro (que posee 12 caras pentagonales) y después, en un icosaedro (con 20 caras triangulares). Los cinco poliedros platónicos —tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro— quedan escenificados en la danza.

Las transformaciones de esta clase resultan más sencillas de descubrir usando cuerdas reales que trazando esquemas sobre el papel. Además, la búsqueda de figuras y transformaciones nuevas es una actividad de grupo; para sostener las cuerdas es necesario un número suficiente de manos. De ordinario, cada vértice del poliedro está sostenido por una sola mano (de aquí que intervengan 10 personas para formar un dodecaedro, que tiene 20 vértices). Empero, conseguir situar a los bailarines de manera que la figura que están construyendo pueda ser vista con claridad por los espectadores es problema delicado.

Las danzas con figuras cordales pueden arrojar luz sobre la matemática "seria". Por ejemplo, si seguimos la pista a los lados que habrán de quedar duplicados nos encontramos con los que en teoría de grafos reciben el nombre de "ciclos de Euler". Un grafo consiste en una colección de nodos (puntos) conectados por lados (líneas); un ciclo euleriano es un camino cerrado que pasa por cada uno de los lados. En las danzas, los nodos son las manos de los participantes, y los lados, las secciones de cuerda que delimitan el poliedro que se está construyendo. Sin embargo, algunas aristas del poliedro están definidas por dos o más líneas de cuerda. ¿Por qué es así? ¿Podrán los danzantes formar poliedros que tengan sólo una línea en cada arista?

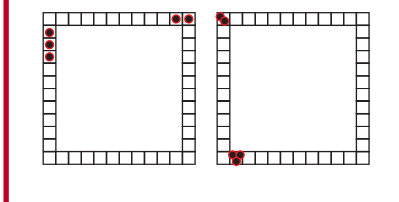
La respuesta, en general, es negativa. Supongamos, por sencillez, que hay un solo aro de cuerda. Esta forma entonces un ciclo cerrado que recorre cada arista del poliedro. En 1735, Leonhard Euler afrontó esta cuestión en el célebre problema de los puentes de Königsberg. En el río Pregel, en la ciudad de Königsberg, hay dos islotes. En aquel entonces, siete puentes conectaban las islas entre sí y con las riberas. Según se decía, los moradores de la ciudad habían estado muchos años tratando vanamente en sus paseos de hallar un recorrido que les permitiera pasar por cada puente una y sólo una vez. Euler demostró que tal camino no existe.

¿Cómo logró demostrarlo? En primer lugar, consideró que las cuatro masas de tierra, a saber, las dos islas (*a* y *d*) y las dos orillas (*b* y *d*) correspondían a nodos, y que los siete puentes eran lados, traduciendo así el problema del paseo al del recorrido de un grafo. A continuación demostró que, si se exige que un ciclo cerrado haya de recorrer exactamente una vez cada lado del grafo, en cada nodo concurrirá un número par de lados. La idea clave es que, cada vez que el ciclo, al ir recorriendo un lado, llega a un nodo, ha de salir de ese nodo por un lado distinto. Así pues, los lados que concurren en un nodo han de agruparse por pares y, por tanto, han de ser un número par. Esta condición de paridad no se da en el grafo de los puentes de Königsberg —hay tres lados concurrentes en los nodos *b*, *c*, y *d*, y cinco nodos se reúnen en el nodo *a*— y por consiguiente, un ciclo cerrado no podrá pasar por cada lado sólo una vez. Más importante, Euler demostró también la recíproca de la condición de paridad: en todo grafo conexo (o sea, de una sola pieza) que posea la condición de paridad ha de existir un ciclo cerrado que pase exactamente una vez por cada lado.

Este teorema nos permite comprender las líneas dobles que se dan en las danzas. Tomemos, por ejemplo, el dodecaedro. Hay en este caso 20 nodos —los vértices del dodecaedro— conectados por 30 lados. En cada vértice concurren tres lados (un número impar), por lo que no puede existir un ciclo en el que cada lado sea recorrido solamente una vez. Pero si un lado se dobla por la mitad, los vértices de sus extremos son ahora alcanzados por cuatro lados, número par. ¿Será posible hallar 10 lados que, doblados a la mitad, produzcan un número par en cada vértice? Si no lo es, se podría duplicar el número de lados: en tal caso, serían seis los concurrentes en cada vértice. Ahora bien, ¿son realmente necesarios tantos?

Acuse de recibo

En "Destellos sincrónicos de las luciérnagas" [mayo] preguntaba yo si el juego que llamé "Flash" podría, en lugar de conducir a una sincronía completa, evolucionar hasta un ciclo periódico con las fichas situadas en más de un cuadro. Ello no ocurre en el modelo matemático estándar de sincronización de las luciérnagas, en el cual la "fase" del ciclo es una variable continua, pero sí resulta posible en Flash, que es el problema análogo en versión discreta. Williams J. Evans ha descubierto que, si el juego se desarrolla con cinco luciérnagas sobre el perímetro de un tablero de 12 por 12, una posición inicial (*abajo, a la izquierda*) conducirá, al cabo de 27 jugadas, a una segunda configuración (*abajo, a la derecha*) que se repite al cabo de otros 38 movimientos. El ciclo de período 38 continúa después indefinidamente. —*I. S.*



NEXOS

James Burke

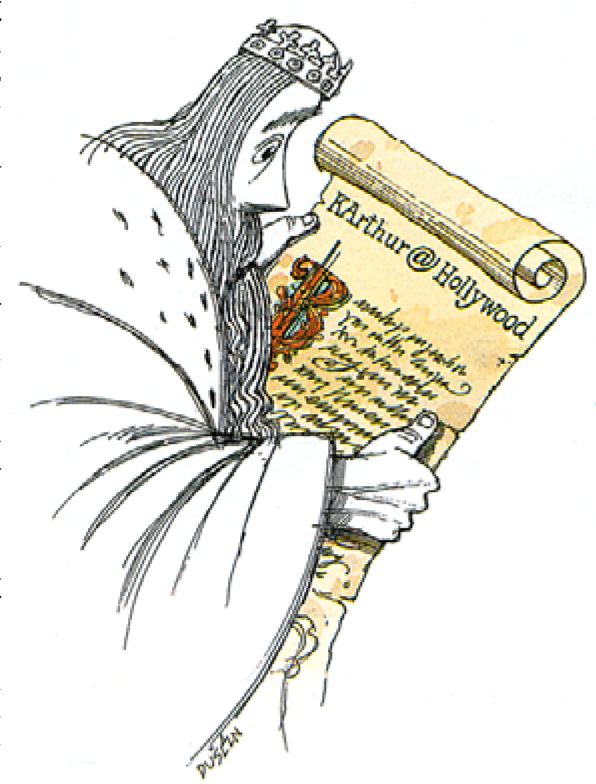
O tal vez no

Con toda la documentación de que se dispone sobre la Edad Media, esa edad oscura (o tal vez no tanto) que sigue a la extinción de las luces brillantes de la cultura europea, resulta lamentable que las películas de Hollywood sigan recurriendo a todo tipo de anacronismos siempre que se ocupan del rey Arturo. Locuciones propias de novecientos años más tarde, caballeros embutidos en imaginativas armaduras que no aparecerán hasta setecientos años después, tabardos señoriales y petos de caballería que se introducirán pasados seiscientos años, castillos con torreones y puentes levadizos que también tardarán seiscientos años, así como jinetes con estribos que no se forjarán antes de quinientos años.

La divulgación de esa sarta de anacronismos podría producir efectos sísmicos. Parecido a uno de resonancia histórica. Ocurrió en el siglo XV. El papado era entonces una autoridad política no menos que espiritual. O como tal se tenía, hasta que en 1440 un emborronador de cuartillas, un humanista filólogo, en resumen, llamado Lorenzo Valla, se dedicó a hurgar en los archivos. (Su patrono, el rey de Nápoles, tenía ciertas discrepancias con el papado sobre asuntos terrenales.) Valla se valió de sus vastos conocimientos de latín para determinar que el lenguaje y la terminología empleados en el documento de la donación del emperador bizantino Constantino —que otorgaba al papa autoridad política en Europa— era en realidad impropio de la época y que la donación era una falsificación escrita unos cuatrocientos años después del supuesto acontecimiento. Ante esa amenaza de pérdida del poder temporal, la curia sufrió más de un sofoco.

Valla se salvó gracias a un amigo suyo bien situado, el cardenal Nicolás de Cusa, quien gozaba del favor del Papa y ayudó a suavizar las cosas. Nicolás de Cusa era un diplomático de altos vuelos y hombre cultísimo. En pleno siglo XV se adelantó a Copérnico afirmando que la Tierra giraba alrededor de su eje y que no era el centro del universo. Creía en la posibilidad de otros planetas habitados. Abogó por métodos experimentales (tales como soltar objetos para medir la velocidad a la que caían y comprobar la resistencia del aire) doscientos años antes que Galileo. Quinientos años antes que Mach o Einstein, ya hablaba de relatividad.

Cuando estudiaba en la Universidad de Padua, Nicolás de Cusa coincidió con Paolo Toscanelli, a quien admiró mucho y de quien diría que era el mejor matemático vivo. Toscanelli era mucho más, como luego se demostraría. Regresó a Florencia después de licenciarse y allí transmitió a un arquitecto amigo suyo los conocimientos aprendidos sobre geometría y perspectiva árabes. Su amigo, Filippo Brunelleschi, aplicó la información para desarrollar líneas convergentes de visión y puntos de fuga, que incitaron a un artista de sobrenombre Masaccio a pintar su *Trinidad* y abrir con ella la puerta a todo el arte renacentista. Se trata de una obra tan realista, que quienes la admiraban creían estar contemplando la escena a través de un agujero en la pared.



Cuando Toscanelli asistió al funeral de Nicolás de Cusa en 1464, andaba entonces muy interesado en la cartografía. Había leído sobre el viaje de Marco Polo y utilizó sus datos para calcular la distancia desde Italia a Japón, para luego exagerarla y hacer más atractiva la alternativa que él proponía (la recortó unos diez mil kilómetros). En el funeral de Nicolás de Cusa, Toscanelli comentó su propuesta con el sacerdote portugués Fernão Martins de Roriz, encargado de la comisión permanente de exploración de su país. Once años tardó Toscanelli en enviarle un mapa para que se lo mostrara al rey, quien descartó la idea. Así que Toscanelli terminaría por ofrecerle el mapa a un marino italiano que se entusiasmó con la posibilidad de llegar al Japón, donde se decía que los techos eran de oro. La ruta occidental de Toscanelli, hacia el Japón a través del océano Atlántico, le pareció suficientemente atractiva como para conseguir fondos y lanzarse al agua. El 2 de agosto de 1492 Cristóbal Colón se embarcó en su viaje sin escalas al Japón con rumbo a la mayor sorpresa de la historia.

Ese mismo día, otros salieron de España por motivos muy distintos. Para los judíos españoles, el 2 de agosto no fue un día cualquiera. Debían convertirse o abandonar España si querían escapar a la tercera alternativa: la ejecución. Portugal resultó el puerto más próximo para la familia Spinoza. Hasta 1580, fecha en que España (y también la Inquisición) exten-

dería sus dominios a Portugal, el lugar seguro más próximo pasó a ser Amsterdam. Allá marchó la familia Spinoza. En 1670 su hijo Baruch, el filósofo, puso en un brete incluso a las comprensivas autoridades holandesas, con una publicación en la que pedía libertad total de pensamiento y expresión, negaba los milagros y la vida de ultratumba y abogaba por una explicación no religiosa, sino matemática del universo.

La finura matemática de Spinoza atrajo la atención de figuras de la ciencia de la talla de Christiaan Huygens. Fue él quien presentó a Spinoza a Henry Oldenburg, un alemán anglófono que era secretario de la Regia Sociedad Londinense. Por cuenta de la misma, Henry estableció una red de corresponsales por toda Europa y pasó noches y días recibiendo y contestando cartas sobre asuntos científicos y, en ocasiones, no tan científicos (lo que sucedía cuando los corresponsales incluían algo de espionaje del estilo "confidencial"). Oldenburg transmitía este material a las autoridades pertinentes. Consiguió de paso que la sociedad ya no tuviera que pagar los gastos de correo. De quien sí se tenía que hacer cargo Oldenburg era de Dora Dury (su pupila), con quien se casó después de la muerte de su primera esposa. El padre de Dora, John, había sido pastor anglicano que había recorrido toda Europa luchando por reconciliar las distintas sectas protestantes. En uno de sus (vanos) intentos llegó a Suecia para persuadir a la reina Cristina de que colaborara en la empresa. Pero Cristina tenía otras cosas en que pensar, por ejemplo, su conversión al catolicismo.

Tenía Cristina un cerebro privilegiado. Solía invitar a ilustres pensadores como estímulo para su actividad intelectual. Hugo de Groot, águila del derecho, fue uno de ellos y también el primero (en 1609) en formular una ley del mar, por la que afirmaba que los océanos no pertenecían a nadie. Semejante proclama cayó mal entre los ingleses, quienes acababan de apresar un navío holandés que volvía de Groenlandia con un cargamento de veintidós morsas, con el argumento de que las aguas de Groenlandia eran inglesas. Así lo codificó el eminente jurista y consejero real John Selden en refutación de de Groot. En 1618, Selden se autopromocionó al redactar un ensayo dedicado al nuevo lord canciller Francis Bacon, de quien se podrían decir tantas cosas que nos conformaremos con apuntar que escribió sobre el progreso del conocimiento humano, que él esperaba llegara a disfrutar todo el mundo (a buen seguro le hubiera encantado esta revista).

Bacon observó que los continentes que confinaban el Atlántico parecían encajar. Hasta 1912 no llegó el hombre que diera con la explicación, la deriva de los continentes. Los geólogos despreciaron la teoría del meteorólogo alemán Alfred Wegener durante 50 años, "un hombre del tiempo". Otra de las obsesiones de Wegener eran los espejismos. Uno de los más complejos es el llamado espejismo de Morgana, la legendaria bruja de las leyendas medievales. Que tenía aún otro motivo para ser famosa, y es que era hermana del rey Arturo.

O tal vez no...

LIBROS

Astronomía

Leyes y geometría

ASTRONOMY IN PREHISTORIC BRITAIN AND IRELAND, por Clive Ruggles. Yale University Press; Londres, 1999.

450 JAHRE COPERNICUS "*DE REVOLUTIONIBUS*". ASTRONOMISCHE UND MATHEMATISCHE BÜCHER AUS SCHWEINFURTER BIBLIOTHEKEN. Edición preparada por Uwe Müller, Menso Folkerts y Wolfgang Kokott. Stadtarchiv Schweinfurt und Dr. Otto-Schäfer-Stiftung E. V.; Schweinfurt, 1998. **JOHANNES KEPLER. GESAMMELTE WERKE. BAND XX. MANUSCRIPTA ASTRONOMICA (I-II). COMMENTARIA IN THEORIAM MARTIS**. Presentación de Volker Bialas. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung; Munich, 1988-1998. **THE HARMONY OF THE WORLD BY JOHANNES KEPLER**. Versión inglesa con introducción y notas de E. J. Aiton, A. M. Duncan, J. V. Field. American Philosophical Society; 1997.

EDMOND HALLEY. CHARTING THE HEAVENS AND THE SEAS, por Alan Cook. Oxford University Press; Oxford, 1998. **READING THE *PRINCIPIA*. THE DEBATE ON NEWTON'S MATHEMATICAL METHODS OF NATURAL PHILOSOPHY FROM 1687 TO 1736**, por Niccolò Guicciardini. Cambridge University Press; Cambridge, 1999. **DIE WERKE VON JAKOB BERNOULLI. BAND 5: DIFFERENTIALGEOMETRIE**. Presentación de André Weil y comentarios de Martin Mattmüller. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1999.

THE MESSIER OBJECTS, por Stephen James O'Meara. Cambridge University Press; Cambridge, 1998.

En la historia el hombre, sus primeras manifestaciones culturales perviven esculpidas en piedra. Pocas aventajan en sobria belleza a las alineaciones y los cercados megalíticos. ¿Reflejan un propósito astronómico? Para responder a esa vieja cuestión con fundamento de causa nació la arqueoastronomía, de la que Clive Ruggles es abanderado riguroso en *Astronomy in Prehistoric Britain and Ireland*.

Al romper el alba del día más corto del año, penetra de repente un cono de luz solar en el interior de la tumba de Newgrange; el fenómeno dura cinco minutos escasos. Para contemplar el orto solar del día más largo, en su máximo esplendor, hay que acudir a Stonehenge. Son ejemplos asombrosos de la postulada asociación entre los monumentos de piedra y la astronomía. La leyenda les ha atribuido, además, propiedades terapéuticas. Y una arqueología presta a la interpretación simbólica los vincula a cultos solares.

Pero el dato desnudo es que las cámaras funerarias, las hileras de piedras y los monolitos enhiestos constituyen un legado milenario de la prehistoria de las islas Británicas, desde el Neolítico hasta la Edad del Bronce Medio. Entre el 4250 a.C. y el 2750 a.C. los pueblos agrícolas de Inglaterra, Gales, Escocia e Irlanda entierran a sus muertos en cámaras. Las cámaras funerarias centrales se abrían directamente al exterior; las de corredor presentaban un pasillo de entrada. Decoraban con motivos geométricos sus paredes y techumbre.

Newgrange forma parte del cementario en tumbas de corredor de Boyne Valley, un rico complejo de monumentos prehistóricos construido en el cuarto y tercer milenio antes de Cristo en plena tierra de labor. Constituye un símbolo de la arquitectura megalítica, pero, en rigor, su relación con fenómenos solares no puede ni desmentirse ni afirmarse.

Envuelto en la polémica se halla también el significado de Ballochroy, santuario de los partidarios de la astronomía megalítica. Allí encontramos dos puntos de registro —dos monolitos— sumamente precisos de los solsticios: uno marca la puesta del sol en mitad del verano y el otro la puesta del sol en mitad del invierno. Se ha especulado si en Brainport Bay podemos ver un complejo calendárico. No pasa de ser mera opinión.

El Stonehenge que observamos ahora es resultado de una serie de construcciones y modificaciones a lo largo de 1500 años que han sobrevivido. A grandes rasgos, Stonehenge 1 era un cercado aterraplanado en el 3000 a.C. Dibuja un anillo circular de 56 agujeros, los Aubrey Holes, que se hallan espaciados entre 4,5 y 4,8 metros. Le sucedió Stonehenge 2, en torno al 2900-2550 a.C., que supone la adopción de la madera. Stonehenge 3 comienza hacia al 2550 a.C. con la llegada de bloques de piedra, el levantamiento de Heel Stone y la construcción del rectángulo Station Stone. Se ha debatido el sentido de Heel Stone y su relación con el orto solar. También se ha aducido que los Aubrey Holes servirían para predecir eclipses, mediante el movimiento de postes de acuerdo con determinadas reglas. No obstante, en todos los casos mencionados resulta harto arriesgado defender hipótesis verosímiles.

La astronomía sistemática de Occidente vivió durante siglos de Aristóteles. Su *De coelo* exponía los movimientos observados en el firmamento coherentes con la idea, forjada por el sentido común, de una Tierra sólidamente fija en el centro del universo; su *Metafísica* definía la naturaleza constituyente de los cielos y su organización. Pero no encontramos argumentos matemáticos de la física celeste hasta el *Almagesto* de Ptolomeo y su sistema geométrico de epiciclos. Sobre ambos autores descansará el saber medieval y humanista.

Se afirma, a modo de apotegma, que "la pax ptolemaica", desde mediados del siglo XV más aparente que real, se rompe en 1543, en Nuremberg. Qué aconteció entonces es la razón de *450 Jahre Copernicus "De revolutionibus". Astronomische und mathematische Bücher aus Schweinfurter Bibliotheken*. De todos los trabajos que reúne el volumen, catálogo razonado e investigación astronómica y matemática a un tiempo, me ceñiré a las breves páginas de Owen Gingerich consagradas a la recepción e interpretación primerísima de los *De revolutionibus orbium coelestium libri sex* a través de las acotaciones manuscritas que ha descubierto en ejemplares de las edición princeps de 1543 y la de Basilea de 1566. A estos comentaristas espontáneos les interesó, se ve, la modelización geométrica de los movimientos de los

planetas y las tablas para predecir las posiciones de éstos no menos que la nueva teoría heliocéntrica del mundo.

La imagen de una Tierra que giraba sobre su eje y trazaba una órbita anual en torno al Sol parecía, en el mejor de los casos, ridícula y opuesta a la física aceptada y, en el peor, contraria a la lectura directa de la Biblia. Lo avisaba ya Andreas Osiander a sus correligionarios protestantes en la introducción controvertida que antepuso al *De revolutionibus*; se adelantaba a las críticas de la cosmología heliocéntrica, sugiriendo que el modelo de Copérnico debía considerarse un mero ejercicio matemático. Georg Joachim Rheticus, discípulo de Copérnico, se mostró enojado ante semejante cuña y en varios ejemplares la tachó con lápiz rojo.

Aproximadamente el 6 % del *De revolutionibus* tiene que ver con la nueva cosmología, que alcanza su clímax en el capítulo 10 del libro primero. El 94 % restante es endiablado artificio matemático para representar las trayectorias celestes con combinaciones de movimientos circulares uniformes. De los primeros lectores, unos apostillaban sólo las secciones cosmológicas, mientras que una minoría (aunque en general el grupo más interesante) glosaba las partes más técnicas de la otra. Destaca entre los segundos Erasmus Reinhold, profesor de astronomía en Wittemberg. En las notas marginales de su ejemplar observamos las huellas de un astrónomo fascinado por el éxito de Copérnico con las combinaciones de círculos en movimiento uniforme.

A Copérnico le repugnaba el aspecto monstruoso del sistema ptolemaico, donde cada planeta se consideraba por separado, con su epiciclo y ciclo transportante. Nada que se ajustara a un "cosmos", a una estructura armónica, ordenada. En el sistema copernicano, por contra, todo se desenvolvía elegantemente engarzado en órbitas específicas en torno al Sol. Mercurio, el planeta más célere, orbitaba inmediato al Sol, mientras que Saturno, el más lento, residía en la posición más externa; en medio, la cadencia de los planetas restantes.

Marte, Júpiter y Saturno brillaban periódicamente, se detenían en su movimiento normal hacia el este y luego procedían hacia atrás (movimiento retrógrado) durante varias semanas. De forma coincidente, eso ocurría siempre que el planeta se hallaba en una posición antagónica. El sistema ptolemaico carecía de argumentos para dar cuenta de tamaña conexión entre la posición del Sol y el planeta retrogradante, asociación que en el sistema copernicano venía exigida por la geometría.

Johannes Pretorius, Paul Wittich, Michael Maestlin y Tycho Brahe, en el continente, John Dee y Thomas Digges en Inglaterra, se aprestaron a medir distancias en el sistema solar para comparar el sistema ptolemaico con el copernicano, y actuar en consecuencia. Algunos consideraron otras posibilidades de organización; por ejemplo, que los planetas giraran en torno al Sol, y éste, con los demás, en torno a la Tierra, fija en el centro del cosmos. Creían que con semejante solución se salvaba la física aristotélica y la interpretación literal del texto sagrado.



El Sol ilumina el interior de la cámara funeraria de Newgrange



Amanecer en Stonehenge

Discípulo de Maestlin, seguidor del heliocentrismo copernicano, fue Johannes Kepler (1571-1630), cuyas obras completas (*Gesammelte Werke*) han alcanzado ya el volumen segundo del tomo vigésimo, dedicado a los manuscritos vinculados a su colaboración con Tycho Brahe. Magna investigación ésta que rinde homenaje al empeño de Max Caspar, y que no debiera faltar en nuestras bibliotecas universitarias, no sólo para consulta historiográfica, sino también como ejemplo de lo que debe ser un comentario interpretativo (*Nachbericht*).

Kepler estudió matemática y astronomía en la Universidad de Tübingen. Se matriculó en teología con la intención de hacerse pastor luterano. Aunque no llegó a ejercer, su obra está transida de pensamiento religioso. En 1594 aceptó un puesto de profesor de matemática en Graz. Aquí redactó *Mysterium cosmographicum* (1596), esbozo de su idea del universo que llamó la atención de Brahe, quien le ofrece trabajar con él en Praga. Le asigna de entrada resolver el problema de Marte. Kepler descubre que sigue una órbita elíptica. Fruto de su dedi-

cación a Marte fue *Nova Astronomia*, donde aparecen la primera y segunda ley de Kepler: la de la elipticidad de las órbitas planetarias con el Sol en un foco y la del barrido de áreas iguales en tiempos iguales. Reflexiona sobre la supernova de 1604 (*De Stella nova*) y escribe dos tratados de óptica. Tras una serie de reveses políticos y familiares, se trasladó a Linz, donde termina *De harmonice mundi* (1619), obra concebida veinte años antes y donde aparece su tercera ley, que relacionaba los tiempos periódicos de los planetas con sus distancias medias al Sol. Publicó también un epítome de astronomía copernicana. Su última obra importante, las *Tabulae rudolphinae* (Ulm, 1627), de una precisión desconocida, hizo mucho por la superioridad de las teorías keplerianas.

Recuerda en el prefacio del *Mysterium cosmographicum* que, siendo ya alumno de Maestlin, ponderó la superioridad matemática del sistema de Copérnico sobre los sistemas de Ptolomeo y Tycho. Aborda ahora las razones del número de los planetas (6) y las dimensiones de sus órbitas en relación con los cinco poliedros regulares (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro). No es que creyera que los sólidos platónicos estuvieran físicamente contenidos en los cielos, sino que constituían arquetipos que gobiernan la disposición de las órbitas planetarias. Sitúa las causas del movimiento en una *anima movens* que emanaba del Sol.

Muchos protestantes habían adaptado el modelo copernicano a un marco geostático. Dentro de ciertos límites, los astrónomos gozaban de libertad para inventar círculos matemáticos, epiciclos y excéntricas con que describir los movimientos aparentes de los planetas. A la postre serían hipótesis. Kepler explicita su opinión sobre las hipótesis en *Apologia Tychonis contra Ursum*, contra la pretensión de Raimarus Ursus de la prioridad del sistema de Brahe. Para Kepler la distinción entre hipótesis verdaderas y ficticias se correspondía con las hipótesis astronómicas y geométricas. Si un astrónomo dice que la trayectoria de la Luna es la de un óvalo, sostiene una hipótesis astronómica que representa el movimiento verdadero. Pero cuando propone una combinación de movimientos circulares mediante la cual puede describirse una órbita oval, está postulando una hipótesis geométrica o ficticia.

El *De harmonice mundi*, ahora presentado en versión inglesa comentada (*The Harmony of the World*), debía completar el *Mysterium cosmographicum*. Aunque el concepto de armonía de los cielos se remontaba a los griegos y era un recurso literario bien manejado por Dante y Shakespeare, no había calado en sus contemporáneos. Los avances del álgebra y la introducción del simbolismo privilegiaba una visión nominalista de la matemática, alejada del platonismo kepleriano.

Gracias al descubrimiento de la tercera ley del movimiento planetario en 1618 Kepler coronó *De harmonice mundi*, donde elabora una teoría racional, fundada en la geometría, de la operación de la armonía en las obras de los hombres, la naturaleza y la creación del mundo. Acepta el sistema de la justa entonación de Gioseffo Zarlino y la teoría de la armonía de Ptolomeo, quien asignaba notas a los cuerpos celestes de acuerdo con su distancia de la Tierra. Kepler vertebra su teoría en una serie de definiciones, axiomas y proposiciones. Halla que los movimientos angulares de los planetas, medidos en torno al Sol en sus distancias máximas y mínimas, se corresponden con la razón de números enteros de las armonías musicales. El acuerdo entre las predicciones de su teoría armónica y los datos empíricos resulta impresionante. En las figuras geométricas funda las proporciones armónicas, de acuerdo con los dos principios siguientes: primero, un intervalo sólo puede aceptarse como armónico si satisface el juicio del oído; segundo, no es el sentido del oído, sino el alma o intelecto lo que distingue los intervalos consonantes de los disonantes, de suerte que los límites de los intervalos consonantes son cognoscibles, no así los límites de los intervalos disonantes.

El arco de bóveda que cierra la revolución copernicana, apuntalada con las tres leyes de Kepler, son los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton, obra en cuya preparación, revisión, financiación, publicación y pronta difusión tomó parte activa Edmond Halley (1656-1742). Sobre este profesor de geometría, astrónomo real y científico eminente, Alan Cook ha escrito una biografía intelectual de más que mediano mérito: *Edmond Halley. Charting the Heavens and the Seas*. Aunque asociada su fama a la predicción de la vuelta del cometa que lleva su nombre, los intereses de Halley trascendieron el movimiento de la Luna y las estrellas, sus grandes aportaciones, para adentrarse en la investigación del campo magnético terrestre y las mareas.

Desde su tiempo de estudiante mantuvo una estrecha relación con Flamsteed. A su lado aprendió a observar los eclipses. Expresión de esa vocación temprana por la astronomía son sus tres primeras disertaciones, de 1676, empezando por *Un método geométrico directo para determinar los afelios, excentricidades y proporciones de las órbitas de los planetas primarios, sin suponer igualdad del movimiento angular en el otro foco de la elipse*, donde "proporciones" significa la razón entre los semiejes mayores de las órbitas de la Tierra y el planeta y, por planetas primarios, han de entenderse los exteriores. Vino luego el *Extracto de un informe dado de las observaciones de Mr. Flamsteed y Mr Edmund Halley* relativo a las manchas solares. Por fin, *Observaciones de Mr Edmund Halley sobre la ocultación de Marte por la Luna, realizadas en Oxford el 21 de agosto, p.m., del año 1676*. Nada tenía, pues, de particular, que antes de graduarse en Oxford, el Consejo de la Compañía de las Indias Orientales recibiera una carta de Carlos II para que trasladaran a alumno tan brillante a santa Elena.

A los veinte años, se embarcó en el *Unity*, rumbo a la isla en que debía registrar las posiciones de las estrellas meridionales, invisibles desde Europa, y observar eclipses y un tránsito solar de Mercurio. Mediante las anotaciones del eclipse lunar y solar, podría determinar la longitud de santa Elena; a través del seguimiento del tránsito inmediato de Mercurio, la paralaje. "He tenido, escribirá el año siguiente, la oportunidad de observar el ingreso y el egreso de Mercurio del Sol, que, comparada con similar Observación realizada en Inglaterra, nos dará una demostración de la paralaje del Sol, que hasta ahora no se ha demostrado nunca, sino con argumentos de probabilidad." La paralaje solar es el ángulo subtendido por la Tierra en el Sol.

El saber orientarse resultaba vital para una política y una economía que dependían del dominio de los mares. La resolución de la latitud no constituía un grave problema intelectual, pues son 90 grados menos la distancia angular desde el polo Norte; es igual a la elevación de la estrella Polar por encima del horizonte. Pero harina de otro costal era hallar la longitud, ángulo entre el plano meridiano a través del lugar y otro plano meridiano de referencia. (Al no existir una opción natural del plano de referencia, los ingleses aceptaban el meridiano de Greenwich y los france-



Isaac Newton (1642-1727)



Edmond Halley (1656-1742)

ses el meridiano del Observatorio de París.) La determinación de la longitud exigía contar con sendos relojes que marcaran la misma hora en los dos lugares. Hasta que Harrison fabricó sus prototipos, a mediados del siglo XVIII, no podía confiarse en ningún reloj mecánico, y menos a bordo.

Los navegantes se servían de relojes astronómicos naturales, la propia Luna o los satélites de Júpiter. La distancia angular de la Luna respecto del Sol (distancia lunar) constituye una medida de tiempo que puede determinarse en cualquier meridiano. Pero la aplicación está muy lejos de ser simple. El ángulo entre el Sol y la Luna no puede medirse directamente cuando ambos cuerpos están muy próximos (Luna nueva) o cuando se hallan muy alejados (Luna llena). Hay que localizar, pues, el Sol y la Luna entre las estrellas. Pero las posiciones de las estrellas no se conocían muy bien a mediados del siglo XVII.

En sus trabajos Halley se sirvió de un sextante de 1,8 metros, montado sobre dos semicírculos dentados y movidos por tornillos de Arquímedes, de suerte que se apuntara hacia dos estrellas a la vez. Confeccionó el primer *Catalogus stellarum Australium*. Identificó el carácter errático del movimiento de la Luna, que dependía de la distancia variable de la Tierra respecto del Sol en su órbita elíptica. Cartografió los vientos; observó la depresión de su barómetro con la altura. Newton se aprovechó de sus datos sobre el péndulo para demostrar que la gravedad era menor en las bajas latitudes y, por tanto, que la Tierra estaba achatada en los polos.

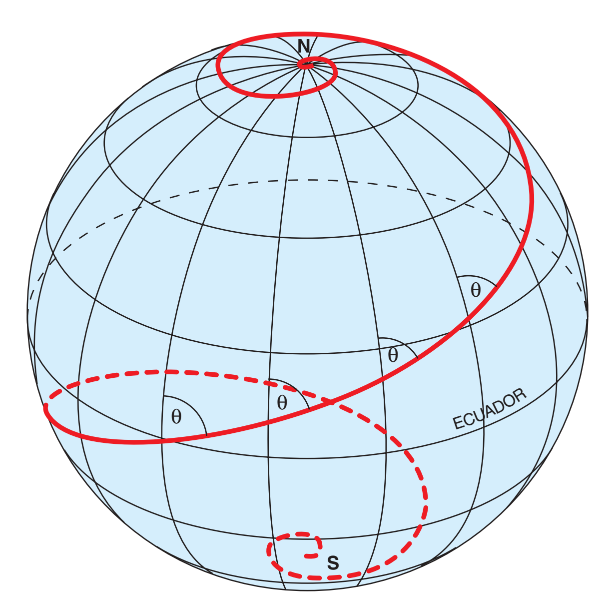
Halley consolidó su formación en el continente. Estuvo en Danzig con Hevelius. Acudió al Observatorio Real de París, dirigido por Gian Domenico Cassini, quien había descubierto cuatro satélites de Saturno, observado los satélites mediceos de Júpiter y levantado tablas de sus órbitas. Cassini, muy conocido en Inglaterra, supo también del trabajo de Halley en santa Elena y sus *Catalogues des estoilles Australes*, como habíase traducido su obra en 1679. En 1680-81 se produjo el paso espectacular de un cometa de magnitud enorme; no fue el "Halley", que se presentó en 1682. Pero sirvió para que Cassini y otros pensaran en el retorno de los cometas y hubiera quienes se aprestaran a describir sus órbitas. Newton, que generalizó el concepto de órbita bajo la ley de atracción del inverso del cuadrado, supo sacarle partido a las observaciones de Halley en Francia.

En los *Principia*, Newton asienta los principios de dinámica, propone el concepto de gravitación universal y demuestra que en ésta encuentran explicación los fenómenos de mecánica celeste. Ese haz de resultados pertenecen a la "filosofía natural", más conocida que sus "principios matemáticos", Niccolò Guicciardini se ha empeñado en equilibrar la balanza con *Reading the Principia*, tras la senda iniciada por Tom Whiteside.

Newton suplió la falta de una herramienta matemática universal con la aplicación de numerosos métodos. Su formación matemática, autodidacta, arranca en 1664 cuando caen en sus manos escritos de François Viète, la *Geometria* de Descartes, la *Clavis mathematicae* de William Oughtred y la *Arithmetica infinitorum* de John Wallis. Así va adentrándose en los secretos de la geometría analítica, álgebra, tangentes, máximos y mínimos, cuadraturas, series y productos infinitos. Por su propio pie llega al teorema del binomio. Y esboza el método analítico de las fluxiones, el equivalente newtoniano del cálculo diferencial e integral de Leibniz. "Cuadró" —en términos leibnizianos "integró"— una clase amplia de curvas.

Hasta el tercer decenio del siglo XVIII el debate sobre las matemáticas de los *Principia* concernía a sus dos primeros libros, pues la mayoría de los resultados del tercero se suponían aplicaciones de los constructos matemáticos desarrollados en aquéllos. Pero Newton no podía tejer con tales mimbres su sistema del mundo, del movimiento planetario a las mareas. Repetía a menudo que había empleado el método de las fluxiones en la secuencia de proposiciones de los *Principia*. No es del todo exacto. El análisis interno de la estructura de la demostración en los *Principia* revela que la filosofía natural geométrica de Newton es, en muchos casos significativos, independiente de las técnicas de cálculo.

Igual que Newton, Jacob Bernoulli insistió en la traducción de los nuevos resultados del cálculo a geometría euclideana. En magnífica edición las



"Rumbus nautarum" o loxodromia

Werke de Bernoulli arriban a su quinto volumen, dedicado a la geometría diferencial de las curvas planas. Lo presenta André Weil y lo deslíe en precisos comentarios Martin Mattmüller. Con doce memorias de Jacob encontraremos los dos trabajos de Leibniz que motivaron la famosa disputa sobre la prioridad del cálculo: *Nova Methodus pro Maximis et Minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas, nec irrationales quantitates moratur, et singulare pro illis calculi genus*, de 1684, y *De Geometria Recondita et Analysi Indivisibilium atque Infinitorum*, de 1686.

En 1687, Leibniz había propuesto el problema siguiente: "Hallar una línea de descendencia, en la cual el cuerpo grave cae uniformemente y se acerca igualmente al horizonte en tiempos iguales". Llamó isocrona a esa línea. Más tarde, generalizó la definición sustituyendo las palabras "se acerca igualmente al horizonte" por "se acerca (o aleja) igualmente a un punto dado"; denominó "isocrona paracéntrica" a la solución del nuevo problema. Pero era la suya una solución "sintética", sin referencia a deducciones a partir de las condiciones dadas. Jacob Bernoulli aporta su solución analítica y muestra que la condición impuesta por el problema en la ecuación $y = f(x)$ de la curva buscada es igual a la ecuación diferencial $dy\,\sqrt{b^2y - a^3} = dx\,\sqrt{a^3}$, tras lo cual se integra fácilmente; la solución es una "parábola semicúbica".

De la isocrona pasa Jacob a la catenaria. Se trata de hallar la curva que describe una cuerda flexible suspendida entre dos puntos fijos. Se supone que la cuerda es inextensible y de espesor uniforme. La curva buscada es una cadena de aros pequeños, de donde el nombre de "catenaria" (cadenita) o "funicularia" (cuerdecita). La formalización del problema se hace por principios elementales de estática, para terminar con la ecuación diferencial $dy = a\,dx/\sqrt{x^2 - a^2}$, que se integra por medio de la función logarítimica, o, en el lenguaje de Bernoulli, por la cuadratura de la hipérbola. Resuelto el problema, generalizó la solución al caso de una cuerda extensible. Al hilo de la catenaria, aborda la flexión de las vigas y las planchas elásticas. Enuncia, bajo cuatro formas diferentes (según la elección de la variable independiente y según que la curva esté dada en coordenadas cartesianas o en coordenadas polares), el teorema que presenta el radio de curvatura en función de las diferenciales primeras y segundas de la función que figura en la ecuación de la curva. Lo llamó su "teorema áureo".

En la *De cycloide* de Wallis se inspiró Bernoulli para elaborar sendas memorias sobre la "espiral parabólica" y la "espiral logarítmica". La curva "loxodrómica" extiende a la esfera la definición de espiral logarítmica, la *spira mirabilis* que pide que se grabe en su tumba. Empieza entonces a interesarse por los contactos entre curvas planas, de los que la teoría de los círculos osculantes es un caso típico. Creía Leibniz que el círculo osculante en un punto P de una curva plana poseía en P, con la curva, cuatro puntos de intersección. Pero Jacob descubrió que entre una curva y su círculo osculante en un punto P sólo había tres puntos de intersección.

El nombre de Bernoulli irá por siempre asociado a dos curvas, la espiral logarítmica y la "lemniscata". Mas, en honor de las verdad, la segunda sólo le debe su primera mención y su nombre; su desentreñamiento quedó reservado a Fagnano, Euler y Legendre.

En 1758 mucha gente miraba al firmamento a la caza del cometa cuya fecha de retorno había predicho Edmond Halley. Lo divisó Charles Messier (1730-1817), adscrito al Observatorio de la Marina, que Joseph Nicolas Delisle había establecido en Hôtel de Cluny de París. Con los años, aquel joven perspicaz catalogaría galaxias, cúmulos estelares y nebulosas, *The Messier Objects*. Esas estructuras integran el mejor vademécum para el aficionado a la astronomía. Pensando en su fuerza cautivadora, O'Meara ha preparado un álbum exclusivo de fotografías, mapas celestes y datos, incluidos los recabados por el Telescopio Espacial Hubble.

Mirando por el telescopio Messier descubrió cierta noche de agosto de 1758 una débil mota deshilachada en la constelación de Tauro. Parecía un cometa, pero no podía serlo, dedujo, pues persistía inmóvil entre las estrellas. Anotó su posición en su mapa estelar, para evitar caer en la misma confusión otra vez. Se trataba de la Nebulosa del Cangrejo, el primero de una lista de 45 objetos "raros" que publicó en 1774. Conforme proseguía su rastreo cometario, iba incrementando ese elenco particular. En 1781 el catálogo recogía 103 entradas.

Pero Messier murió mucho antes de que la astronomía del siglo XX conociera a fondo la naturaleza de esos brillos difusos. Los 110 "objetos Messier" son un conjunto variopinto de tesoros celestes: 39 galaxias, 57 cúmulos estelares, 9 nebulosas, una remanente de supernova, un segmento de Vía Láctea, cierto agrupamiento de estrellas, una estrella doble y un objeto duplicado. La lista encierra la galaxia dotada de mayor masa y luminosidad de cuantas se conocen, los restos fantasmales de una explosión estelar cataclísmica y un inmenso paisaje nebular que mece estrellas recién nacidas en densos capullos de gas hidrógeno. Todos los objetos Messier están al alcance de un telescopio sencillo, en muchos bastan unos simples binoculares o la mirada atenta en noche clara. Como en Stonehenge.

LUIS ALONSO

Astrofísica

Hacia una visión integradora

QUASARS AND ACTIVE GALACTIC NUCLEI, por Ajit K. Kembhavi y Jayant V. Narlikar. Cambridge University Press; Cambridge, 1999.
ACTIVE GALACTIC NUCLEI, por Julian H. Krolik. Princeton University Press; Princeton, 1999.

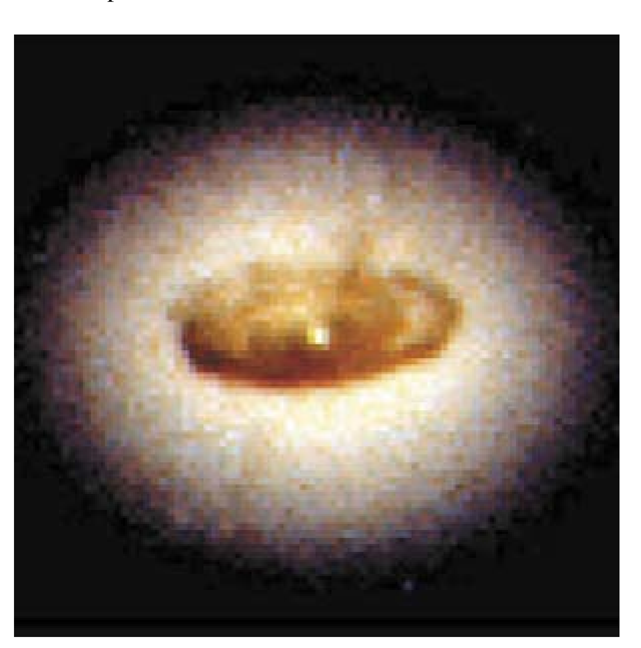
Dentro de la astrofísica moderna, algunos campos han adolecido de distanciamiento entre el ámbito fenomenológico y el de los modelos explicativos. Cuando esto ocurre, proliferan las observaciones en longitud de onda muy diversa de un tipo de objeto astronómico en estudios principalmente descriptivos, inconexos; por otro lado, se trabaja en ideas sin llegar a aventurar sus consecuencias observacionales. En estas ocasiones, el empirista puede muy bien desconocer los modelos explicativos propuestos para su fenómeno y, por tanto, estar lejos de vislumbrar si sus observaciones refuerzan alguno de esos modelos y el teórico no puede hacerse con el marco global que están dibujando las observaciones, ni tampoco prepara predicciones empíricas de sus modelos que puedan guiar al observador.

El campo de los cuásares y núcleos galácticos activos ha sufrido tal separación entre el terreno fenomenológico y el de la teoría. Estos objetos presentan una gran complejidad observacional ya que emiten en todas las longitudes de onda, desde los rayos gamma hasta ondas radio, y además muestran un amplio rango de variación en la emisión que recibimos de ellos en distintas longitudes de onda (algunos emiten fuertemente en ondas radio, otros no; la amplitud de las líneas espectrales en el óptico es susceptible de una subclasificación). Bajo esa apariencia diversa subyace el mismo fenómeno astrofísico, dependiendo sus propiedades en gran medida de la perspectiva geométrica distinta desde la que se observan. La variedad de galaxias con actividad nuclear pronunciada presentaba aspectos que la subclasificó en radiogalaxias, objetos BL Lac, galaxias Seyfert, galaxias FR I y FR II.

Sólo hace unos años se ha afirmado el principio unificador que se impone detrás de cuásares y núcleos galácticos activos, el de que su extraordinaria actividad energética es debida a la presencia en el núcleo de estas galaxias de un agujero negro central supermasivo que se alimenta de la materia en rotación (estrellas, gas, polvo) en torno a él. El material del disco de acreción que se mueve a velocidades relativistas al ir cayendo hacia el agujero negro es el que proporciona la energía central. Chorros colimados de partículas relativistas y fotones se emiten perpendicularmente al plano de rotación del material entorno al núcleo y serían responsables de lo observado en ondas radio y a energías gamma. La dirección del chorro relativista colimado en relación a la visual del observador da lugar a variaciones en la intensidad y características de la emisión recibida.

Aunque no se descarta la contribución de otros procesos a la actividad nuclear de estas galaxias, como por ejemplo, los brotes de formación estelar muy intensos en el centro de estas galaxias primitivas, el modelo del agujero negro supermasivo se ha reafirmado como el mecanismo que explica mejor el balance energético brutal de estas galaxias.

Una vez encontrado el principio unificador de núcleos y cuásares en términos del mismo fenómeno básico, hace falta ejecutar el modelo para compararlo con el grueso de observaciones recabado. La comprensión de los fenómenos radiativos que ocurren en cuásares y AGN se revela fundamental.



Núcleo de la galaxia NGC4261. (NASA)

En esta línea de acercar ideas y hechos se han escrito dos libros que merece la pena señalar. Ambos nacen con la intención de soslayar la desconexión del ámbito teórico y el observacional para dar una visión integradora. Lo logran en un caso y otro con perfiles pedagógicos y grados de completitud diferente.

El libro de Kembhavi y Narlikar agrada por su completitud, inteligente distribución de los temas tratados y explicación clara de los fenómenos dinámicos y los procesos de radiación que están detrás de las observaciones. El rango de temas tratados va desde una introducción a la gran variedad de procesos radiativos que tiene lugar en cuásares y AGN, la presentación del modelo estándar de acreción en torno al agujero negro masivo, la formación del mismo, el entorno que lo circunda, las características de distribución con corrimiento al rojo de los AGN y cuásares (funciones de luminosidad), los resultados de los distintos programas de búsqueda sistemática de estos objetos (en óptico, radio, rayos X); se ocupa del origen de su continuo de emisión, de las propiedades en el ámbito radio, en rayos X y gamma. Presenta los esquemas de unificación que agrupan a cuásares, radiogalaxias, objetos BL Lac, galaxias FR I y Seyfert bajo el mismo tipo de fenómeno. Sin olvidar el efecto de lente gravitacional que da lugar a imágenes múltiples de cuásares.

El libro de Krolik nace con el mismo espíritu de acercamiento de la teoría al fenómeno observado, aunque hay un mayor hincapié en la lectura física del fenómeno y la parte observacional no queda muy documentada. Debe leerse dejándose llevar por el fluir de ideas que nos conduce a través de un entramado de explicaciones que transcurren del ámbito de la hidrodinámica al del transporte de radiación y la física relativista. El autor deja constancia en el último capítulo de los misterios por desentrañar. No se ha llegado aún a comprender qué desencadena y qué pone fin a la actividad nuclear de los AGN y cuásares.

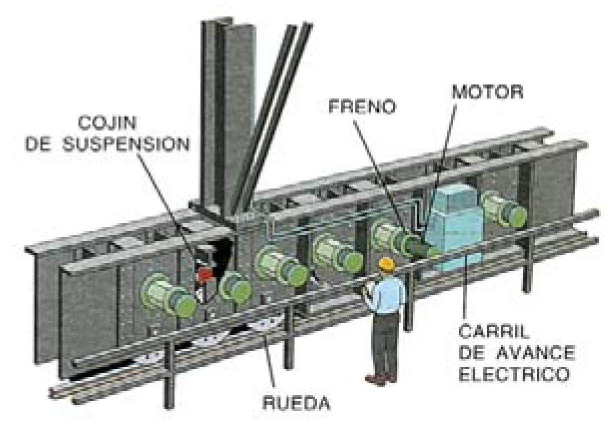
Mucha de esta actividad ocurre a una edad temprana en el universo (menor que la décima parte de la edad actual). Nuestro desconocimiento del porqué de la evolución temporal de esa actividad tiene mucho en común con nuestro desconocimiento de la formación y evolución de galaxias en el universo primitivo.

PILAR RUIZ-LAPUENTE

Techumbres retráctiles

Cyril Silberman, de *Uni-Systems*,
y Earl Santee, de *HOK Sports Facilities Group*

Los arquitectos diseñan las techumbres de los estadios de modo que se abran y cierren para que los terrenos de juego puedan plantarse de hierba natural y no con el duro césped artificial de vinilo y nailon. La protección de los espectadores y jugadores frente a los elementos es cuestión secundaria. Tras la construcción del primero (el Skydome de Toronto en 1989), los proyectistas han aplicado su ingenio al diseño de muchos tipos de techumbres retráctiles. De éstas, por ejemplo, algunas sólo se abren por un pequeño tramo central. Pero la techumbre móvil multipanel del Estadio Enron (*ilustrada abajo*), donde se planea jugar al béisbol el año próximo, dejará al descubierto más extensión de cielo que ningún otro estadio hasta ahora. La techumbre se retirará del terreno de juego, descubriendo incluso una porción en muro de vidrio de la parte más alejada de aquel.



2. RUEDAS DE ACERO FORJADO, de 91 centímetros de diámetro, harán moverse los tres paneles. Cada una de esas 140 ruedas posee su propio mecanismo de frenado y 60 de ellas están dotadas de motor eléctrico. Si una pista estuviera levemente desalineada, todo el peso de un panel podría gravitar sobre una sola rueda, produciendo graves daños estructurales. Para evitarlo, encima de cada rueda se monta un cojín de suspensión de poliuretano que actúa de muelle para distribuir el peso de la techumbre.

1. LOS PANELES DE LA TECHUMBRE MECANIZADA del Estadio Enron se abrirán o cerrarán en 12 minutos. Se estima que en un año avanzarán y retrocederán 160 veces, lo que equivale a una distancia de 23,5 km. Para cubrir el campo, los paneles de acero ruedan uno tras otro sobre pistas situadas en los costados este y oeste del estadio (*1-3*). Con la techumbre abierta, los paneles sur y norte, cada uno de los cuales mide 161 por 38 metros y pesa 1905 toneladas, se anidan en el extremo norte bajo la gran sección central, con sus dimensiones de 322 por 76 metros y su peso de 3810 toneladas. Los ingenieros determinaron la forma de la techumbre (unos paneles laterales más bajos flanqueando un panel central más alto) estudiando el vuelo hiperbólico de una pelota bateada.

1
2
3
MURO DE VIDRIO
PISTAS
PANEL
NORTE
PANEL
CENTRAL
PANEL
SUR
PISTAS

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL OCEANO OCULTO DE EUROPA, por Robert T. Pappalardo, James W. Head y Ronald Greeley

Garabatos y manchas, suaves llanuras y tramas en el hielo. La sorprendente superficie de la luna más brillante y helada de Júpiter nos da indicios de la existencia de un océano, oculto en su interior.

POR QUE SE ROMPEN LAS COSAS, por Mark E. Eberhart

Los investigadores saben desde principios de siglo que los sólidos se abollan o se rompen en función de su estructura química. Pero no habían encontrado hasta ahora una manera de predecir qué tipo de desperfecto se produce.

LA CONSERVACION DEL LEGADO DE NEFERTARI, por Neville Agnew y Shin Maekawa

La tumba de esta reina del antiguo Egipto testimonia el gran amor de su marido el faraón Ramsés II. La forma de conservarla hoy atestigua los progresos de las técnicas de mantenimiento.

HEPATITIS C, por Adrian M. Di Bisceglie y Bruce R. Bacon

Se cuentan por millones las personas infectadas con el virus de la hepatitis C, en su mayoría sin saberlo.

LA FALSA CRISIS DE LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS, por W. Wayt Gibbs y Douglas Fox

El declive de las ciencias en las escuelas públicas norteamericanas, más denunciado que real, está llevando a reformas apresuradas.

BROTES DE FORMACION ESTELAR, por Casiana Muñoz Tuñón y Guillermo Tenorio Tagle

Estructuras de brillo intenso, los brotes, nacidos de la macroagregación de complejos moleculares, forman sistemas de estrellas donde pueden estudiarse el origen y la evolución del universo.

INFORME ESPECIAL:

EN CARRERA: DATOS DE ALTA VELOCIDAD PARA LOS HOGARES, por David D. Clark

La red global está iniciando una nueva etapa de su evolución, que engendrará nuevas aplicaciones y hará de los módems telefónicos piezas de museo.

INTERNET POR CABLE, por Milo Medin y Jay Rolls

DSL: BANDA ANCHA POR TELEFONO, por George T. Hawley

LA MAS ANCHA DE LAS BANDAS ANCHAS, por Paul W. Shumate, Jr.

SATELITES: EL CAMPO DE BATALLA ESTRATEGICO, por Robert P. Norcross

EL SERVICIO DE DISTRIBUCION MULTIPUNTO LOCAL, por John Skoro

LUZ AL EXTREMO DEL CANAL, por P. William Bane y Stephen P. Bradley

